

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Měření vyzařovacích charakteristik pomocí  
spektroradiometru**

**Measuring of space characteristics using a  
spectroradiometer**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Kunčický**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Měření vyzařovacích charakteristik pomocí spektrometru**  
**Measuring of space characteristics using a spectroradiometer**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

- o Fotometrická měření
- o Parametry spektrometru Gooch and Housego OL 770VIS-LED/G-3 LED
- o Měření křivek svítivosti pomocí spektrometru
- o Návrh laboratorní úlohy pro měření křivek svítivosti hlubokozářičů
- o Příklad měření a vyhodnocení křivky svítivosti hlubokozářiče realizovaného pomocí LED


### Seznam doporučené odborné literatury:

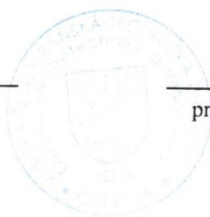
- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [4] Manuály ke spektrometru Gooch and Housego OL 770VIS-LED/G-3 LED

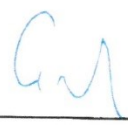
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2016  
Datum odevzdání: 28.04.2017

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlášení:

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny materiály, ze kterých jsem čerpal.“

Poděkování:

Rád bych zde poděkoval prof. Ing. Karlovi Sokanskému, CSc., za veškeré poskytnuté materiály, osobní rady i za jeho volný čas, který mi věnoval při tvorbě této diplomové práce.

V Ostravě dne: .....

.....  
Jakub Kunčický

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá měřením vyzařovacích charakteristik pomocí spektrometru Gooch and Housego OL 770 ve vlastnictví VŠB-TUO. Teoretická část pojednává o principech měření světelně technických veličin. Následuje popis a specifikace spektrometru, včetně schémat zapojení pro měření světelně technických veličin. Praktická část je zaměřena na měření křivek svítivosti světelných zdrojů, hlubokozářičů a hlubokozářičů realizovaných pomocí LED.

## **Klíčová slova**

Měření světelně technických veličin, spektrometr, křivky svítivosti, hlubokozářič, LED, spektrální charakteristiky

## **Abstract**

This Master's thesis deals with measuring of spectral characteristics with spectroradiometer Gooch and Housego OL 770 owned by VŠB-TUO. Theoretical part focus on principles how to measure photometric values. This is followed by description and specification of spectroradiometer, including schematics for measuring photometric values. Practical part shows measuring spectral characteristics of all light sources, of narrow beams and narrow beams realised by LED.

## **Key words**

Measuring photometric values, spectroradiometer, luminance curve, narrow beam, LED, spectral characteristics.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	- 7 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek .....	- 8 -
Úvod .....	- 9 -
1 Fotometrická měření .....	- 10 -
1.1 Přesnost měření .....	- 10 -
1.2 Metody měření .....	- 10 -
1.2.1 Vizualní metody měření .....	- 11 -
1.2.2 Fyzikální metody měření .....	- 11 -
1.3 Podmínky měření .....	- 11 -
1.4 Fotometrie .....	- 12 -
1.4.1 Vizualní fotometrie .....	- 12 -
1.4.2 Fyzikální fotometrie .....	- 13 -
1.5 Měření konkrétních světelně technických veličin .....	- 14 -
1.5.1 Měření osvětlenosti .....	- 14 -
1.5.2 Měření jasu .....	- 15 -
1.5.3 Měření svítivosti .....	- 16 -
1.5.4 Měření světelného toku .....	- 16 -
1.5.5 Měření integrálních charakteristik světelného pole .....	- 18 -
1.6 Nejistoty měření .....	- 18 -
2 Parametry spektrometru Gooch and Housego OL 770VIS-LED/G-3 LED .....	- 21 -
2.1 Představení přístroje .....	- 21 -
2.2 Popis přístroje .....	- 21 -
2.3 Měřené veličiny .....	- 22 -
2.4 Filtr OL 770-15Q-A .....	- 23 -
2.4.1 Ultrafialové pásmo .....	- 23 -
2.4.2 Viditelné pásmo .....	- 23 -
2.4.3 Infračervené pásmo .....	- 23 -
3 Měření křivek svítivosti pomocí spektrometru .....	- 24 -
3.1 Křivky svítivosti .....	- 24 -
3.2 Základní podmínky měření .....	- 24 -
3.3 Goniofotometr .....	- 25 -
3.4 Využití spektrometru namísto luxmetru .....	- 25 -
3.5 Aplikace v praxi .....	- 25 -
4 Návrh laboratorní úlohy pro měření křivek svítivosti hlubokozářičů .....	- 26 -

4.1	Úvod.....	- 26 -
4.2	Zadání laboratorní úlohy .....	- 26 -
4.3	Příprava optického systému .....	- 26 -
4.4	Optická osa.....	- 27 -
4.5	Vliv okolního prostředí .....	- 27 -
4.5.1	Ideální prostředí .....	- 27 -
4.5.2	Reálná situace .....	- 28 -
4.6	Doporučený postup při příchodu do laboratoře .....	- 28 -
4.7	Uživatelské prostředí programu určeného k ovládání goniometru .....	- 29 -
4.7.1	Pohyb v reálném čase.....	- 29 -
4.7.2	Počáteční podmínky .....	- 30 -
4.7.3	Skript.....	- 30 -
4.7.4	Nulová poloha goniometru.....	- 32 -
5	Příklad měření a vyhodnocení křivky svítivosti hlubokozářiče realizovaného pomocí LED- 34 -	
5.1	Úloha č. 1 – Kontrolní měření .....	- 34 -
5.2	Úloha č. 2 – Maximální intenzita (optický střed) .....	- 35 -
5.3	Úloha č. 3 – Vyzařovací úhel.....	- 36 -
5.4	Úloha č. 4 – Uklizená místnost .....	- 37 -
5.5	Úloha č. 5 – Otočení reflektoru.....	- 38 -
5.6	Úloha č. 6 – Křivka svítivosti hlubokozářiče, první měření .....	- 39 -
5.7	Úloha č. 7 – Křivka svítivosti hlubokozářiče, druhé měření.....	- 40 -
5.8	Úloha č. 8 – Křivka svítivosti hlubokozářiče, třetí měření .....	- 41 -
5.9	Úloha č. 8 – Měření spektrálních charakteristik hlubokozářiče.....	- 43 -
5.9.1	Zadání úlohy na měření spektrálních charakteristik .....	- 43 -
5.9.2	Křivka svítivosti LED čipu bez reflektoru .....	- 43 -
5.9.3	Hledání přesného vyzařovacího úhlu hlubokozářiče .....	- 44 -
5.10	Nejnižší možný krok goniometru.....	- 45 -
5.11	Srovnání spektrálních charakteristik .....	- 46 -
5.11.1	Převod na relativní hodnoty - normalizace .....	- 46 -
5.11.2	Výsledná porovnávací charakteristika .....	- 47 -
5.12	Měření teploty chromatičnosti (CCT).....	- 48 -
6	Závěr .....	- 49 -
7	Seznam použité literatury .....	- 51 -
8	Seznam příloh .....	- 52 -

## Seznam použitých symbolů a zkratek

LED	light emitting diode (světlo-vyzařující dioda)
nm	nanometr
cd	kandela, základní jednotka SI soustavy
m	metr, základní jednotka SI soustavy
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
UV	ultraviolet (ultrafialové)
IR	infrared (infračervené)
cm <sup>2</sup>	centimetr čtverečný

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Obr. 1-1.	Schematické uspořádání vizuálního fotometru na fotometrické lavici	- 12 -
Obr. 1-2.	Řešení mihotavého fotometru	- 13 -
Obr. 1-3.	Digitální luxmetr 5032 C (Gossen)	- 14 -
Obr. 1-4.	Princip objektivního jasoměru	- 15 -
Obr. 1-5.	Digitální jasoměr LS-110 (Minolta)	- 16 -
Obr. 1-6.	Uspořádání integračního kulového fotometru	- 17 -
Obr. 2-1.	Spektroradiometr Gooch & Housego OL770	- 22 -
Obr. 3-1.	Základní sestavy měření křivek svítivosti	- 24 -
Obr. 4-1.	Tabulka pro pohyb goniometru v reálném čase	- 29 -
Obr. 4-2.	Tabulka pro počáteční podmínky měření	- 30 -
Obr. 4-3.	Tabulka pro nastavení skriptu programu (část první)	- 31 -
Obr. 4-4.	Tabulka pro nastavení skriptu programu (část druhá)	- 32 -
Obr. 4-5.	Tabulka pro základní nastavení goniometru	- 33 -
Obr. 5-1.	Křivka svítivosti po uklizení místnosti	- 37 -
Obr. 5-2.	Výsledná křivka svítivosti	- 42 -
Obr. 5-3.	Spektrální charakteristika po normalizaci	- 47 -
Obr. 5-4.	Křivka CCT v polárních souřadnicích	- 48 -
Tabulka č. 5.1	Hodnoty intenzity v nulovém bodě, definovaný integrační čas	- 34 -
Tabulka č. 5.2	Hledání maximální intenzity	- 35 -
Tabulka č. 5.3	Hledání vyzařovacího úhlu	- 36 -
Tabulka č. 5.4	Silná nesymetrie i po úklidu místnosti	- 38 -
Tabulka č. 5.5	Silná nesymetrie i po otočení reflektoru	- 38 -
Tabulka č. 5.6	Křivka svítivosti hlubokozáříče, první měření	- 39 -
Tabulka č. 5.7	Křivka svítivosti hlubokozáříče, druhé měření	- 40 -
Tabulka č. 5.8	Křivka svítivosti hlubokozáříče, třetí měření	- 41 -
Tabulka č. 5.9	Křivka svítivosti samotného čipu	- 43 -
Tabulka č. 5.10	Nejvyšší hodnota intenzity	- 44 -
Tabulka č. 5.11	Ověření přibližné hranice úhlu	- 44 -
Tabulka č. 5.12	Nalezení přesného úhlu v záporné horizontální ose	- 45 -
Tabulka č. 5.13	Nalezení přesného úhlu v kladné horizontální ose	- 45 -
Tabulka č. 5.14	Hodnoty teplot chromatičnosti v jednotlivých úhlech	- 48 -



## Úvod

V minulém roce zakoupila VŠB-TUO multikanálový spektrometr firmy Gooch & Housego, konkrétně typ OL 770VIS-LED/G-3 LED. Díky tomuto měřicímu přístroji je možno moderním a přesným způsobem měřit různé druhy světelně technických veličin. Cílem této diplomové práce bude představení přístroje širší veřejnosti, ukázat jeho přednosti a možné praktické úlohy, které spektrometr umožňuje realizovat svou specifickou jednoduchostí a v té nejvyšší přesnosti.

Úvodem je nutno uvést vše potřebné ohledně fotometrických měření. Jedná se o měření světelně technických veličin. Teoretická část se tedy zabývá právě touto teorií, konkrétně jednotlivými měřenými veličinami, jakým způsobem je lze měřit, za jakých podmínek a s jakou přesností.

Do této teoretické části spadá také představení parametrů a funkcí spektrometru, následované podrobným popisem, jak lze díky tomuto přístroji provádět měření křivek svítivosti.

Poslední dvě kapitoly této diplomové práce se budou zabývat praktickým měřením křivek svítivosti a spektrálních charakteristik hlubokozářičů, realizovaných se zdroji LED. K tomu poslouží konkrétní laboratorní úlohy.

# 1 Fotometrická měření

Fotometrická měření, neboli měření světelně technických veličin, slouží ke zjišťování a ověřování parametrů světelně technických přístrojů a zařízení. Ty můžeme rozdělit do tří základních skupin:

- a) **Světelný zdroj** – zdroj elektromagnetického záření, které je možno pozorovat lidským okem (v případě, že bude v rozsahu vlnových délek 380-780 nm). Příkladem světelného zdroje je žárovka, zářivka, výbojka, LED apod.
- b) **Svítilno** – slouží ke snadné a bezpečné manipulaci se světelným zdrojem. Umožňuje jej umístit v prostoru a distribuovat světelný tok do okolí.
- c) **Osvětlovací soustava** – soustava svítidel se světelnými zdroji sloužící k osvětlování větších prostor, jakými jsou chodby, místnosti, prostranství a další.

Využití fotometrických měření je velice široké. Měříme parametry nových světelných zdrojů a svítidel, či nově nainstalovaných osvětlovacích soustav. Vždy je nutno ověřit, zda splňují veškeré normy a platná doporučení, požadavky zadavatele a předpokládané hodnoty dle projektu.

Dále slouží fotometrická měření ke kontrole provozních parametrů již nainstalovaných soustav, jelikož v průběhu jejich využívání dochází ke stárnutí světelných zdrojů i svítidel. Díky fotometrickým měřením můžeme zhodnotit různé konstrukční varianty a typy zařízení, což nám umožňuje návrh alternativních osvětlovacích soustav. Díky fotometrickým měřením můžeme kalibrovat přístroje, vytvářet fotometrické etalony a určovat kvalitu svítidel.

## 1.1 Přesnost měření

Každé měření podléhá určitým pravidlům. Jedním z nejdůležitějších pravidel je přesnost měření. Podle účelu měření je možno říci, jaké budou požadavky na přesnost měření. Přesnost měření se rozděluje do tří skupin podle přísnosti rozšířené nejistoty  $U$  (nejistotám bude věnována jedna z následujících kapitol):

- a) **Přesná měření** – nejpresnější měření, tvorba etalonů, kalibrace, posouzení velmi náročných osvětlovacích soustav, výzkum. Hodnota  $U$  je do 8% včetně.
- b) **Provozní měření** – měření, která se provádějí pravidelně a u kterých se neklade takový důraz na přesnost. Využívají se při ověřování a porovnání parametrů světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav. Hodnota  $U$  je v rozmezí od 8 do 14%.
- c) **Orientační měření** – především ověření podmínek pro zrakovou pohodu. Může také sloužit ke kontrole základních funkcí zařízení. Hodnota  $U$  se pohybuje v rozmezí od 14 do 20%.

## 1.2 Metody měření

Dalším z pravidel fotometrických měření jsou metody, jakými může samotné měření probíhat. Jedná se o metody vizuální a fyzikální.

### **1.2.1 Vizuální metody měření**

Hlavním indikátorem těchto měření je lidský zrak. Jedná se tedy o subjektivní metodu měření. Tato metoda je značně problematická, přestože jsme díky ní schopni dosáhnout velké přesnosti měření. Přístroj, který umožňuje tuto metodu, se nazývá vizuální fotometr. Charakterizuje se zdoluhavým měřením, vysokým požadavkem na zkušenost a zapracovanost pozorovatele. Navíc je tento přístroj velmi robustní.

Další z nevýhod této metody je vysoká úroveň subjektivity – každý pozorovatel má jiné vlastnosti zraku. Zjednodušeně lze říci, že první pozorovatel nevidí naprosto stejně jako pozorovatel druhý. Tyto zrakové vlastnosti mohou být dále ovlivněny podmínkami pozorování.

Chceme-li tyto subjektivní záležitosti omezit na co nejnížší míru, je nutno tyto metody využívat pouze v laboratorních podmínkách.

Vzhledem k výše zmíněným informacím se od vizuálních metod měření upouští a jsou nahrazovány metodami fyzikálními.

### **1.2.2 Fyzikální metody měření**

Jedná se o měření objektivní, měříme pomocí fyzikálních čidel. Podrobněji budou tyto čidla popsány v následujících kapitolách.

V případě, že chceme měřit provozní parametry a ověřovat parametry světelnotechnických výrobků a osvětlovacích soustav, je základním požadavkem rychlost a jednoduchost měření. Není tolik důležitá laboratorní přesnost, můžeme tedy využít fyzikální metody měření pomocí fotometrů.

## **1.3 Podmínky měření**

Třetím a velice důležitým pravidlem při fotometrických měřeních jsou podmínky, za kterých můžeme dané veličiny měřit. Nezávisle na metodě měření musíme dosáhnout takových výsledků, které jsou správné, srovnatelné a reprodukovatelné. Samotné měření je velice pečlivá záležitost. Dodržíme-li tyto podmínky, budou naše výsledky splňovat výše zmíněné požadavky kladené na výsledky měření.

- 1) Měření nesmí být ovlivňováno rozptýleným světlem.
- 2) Čistota - optická část fotometru nesmí být zaprášená.
- 3) Dostatečná fotometrická vzdálenost – zdroj světla musí být tak vzdálený, aby připomínal svítidlo bodového typu. Toho se dosáhne tak, že se bude fotometr nacházet ve vzdálenosti pětikrát až desítkrát větší od měřeného zdroje (svítidla).
- 4) Stabilita – fotometrické přístroje a normály ztrácejí svou přesnost v závislosti na teplotě, únavě a nelinearitě. Stabilitu může ovlivnit nedokonalá shoda přístroje s křivkou poměrné spektrální citlivosti pozorovatele. Je potřeba vzít v potaz odchylky od kosinusového zákona.
- 5) Zahoření – je nezbytně nutné nechat zkoušené zdroje i normály před měřením zahořet. Tím dosáhneme ustálení světelně technických i elektrických parametrů. Doba zahoření se liší dle světelného zdroje.

## 1.4 Fotometrie

Nyní si podrobně rozebereme dva základní druhy fotometrických měření, tedy vizuální a fyzikální fotometrii.

### 1.4.1 Vizuální fotometrie

Slouží především k porovnávání jasů dvou sousedních ploch osvětlených normálovým a zkoušeným světelným zdrojem. K tomu využijeme lidské oko, které tuto vlastnost ovládá, bohužel nám oko nedokáže předat informaci o absolutní hodnotě naměřených veličin.

Základní podmínka pro tato měření je stejná chromatičnost obou ploch. V případě, že je chromatičnost rozdílná, máme možnost ji dorovnat pomocí barevných filtrů.

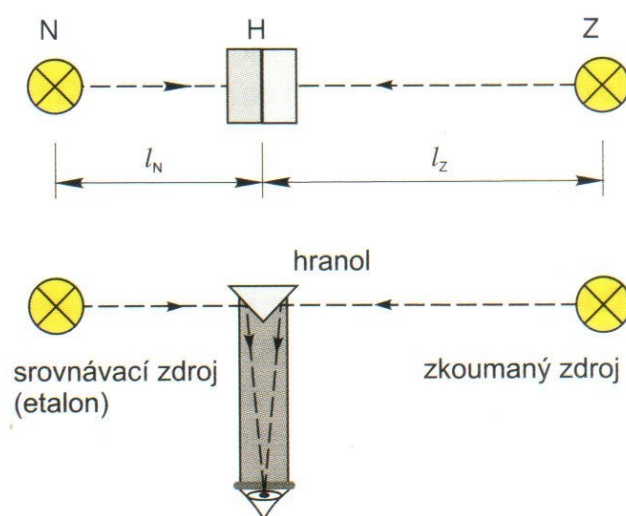
Základním měřicím prvkem pro vizuální fotometrii je vizuální fotometr. Máme dva základní druhy vizuálních fotometrů, fotometr na stejný jas a fotometr na stejný kontrast. Na hlavici fotometru se nachází fotometrická kostka, díky které získáme vhodné fotometrické pole. Na této kostce se nacházejí sousední plochy, které musí být odděleny ostrou dělicí čarou a musí spolu těsně sousedit.

Kromě klasického vizuálního fotometru se využívá také míhavý fotometr.

#### 1.4.1.1 Fotometr na stejný jas

Fotometrická kostka je tvořena trojbokým hranolem, který se z jedné strany osvětluje zkoumaným zdrojem, z druhé strany normálem. Plochy tohoto hranolu musí být dokonale rozptylné – důvodem je fakt, že jasy pozorovaných ploch musí být úměrné jejich osvětlenosti.

Měření probíhá na fotometrické lavici. Ta je tvořena kolejnicemi, po kterých pojíždí vozíky s oběma zdroji světla a s hlavici fotometru. Důležitou podmínkou je nastavení světelných středů obou zdrojů i hlavičky fotometru do jedné optické osy. Pro lepší představu poslouží schematické uspořádání vizuálního fotometru na fotometrické lavici, které je vyobrazeno níže.



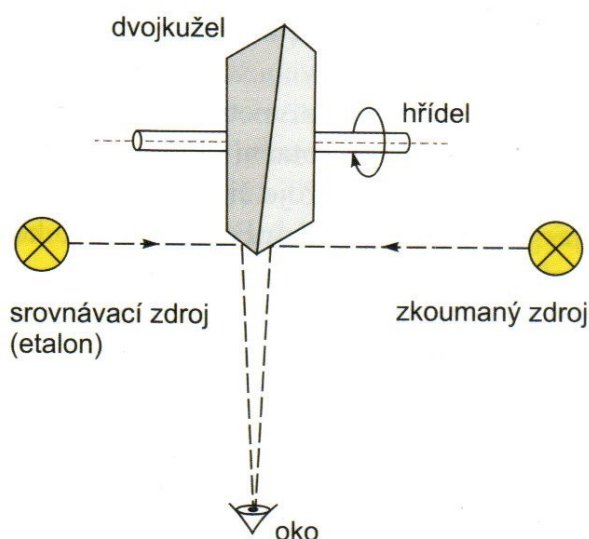
Obr. 1-1. Schematické uspořádání vizuálního fotometru na fotometrické lavici [2]

Svítivost měřeného zdroje  $I_Z$  můžeme určit ze vztahu:

$$\frac{I_Z}{I_N} = \frac{(l_Z)^2}{(l_N)^2} \quad (\text{cd, cd; m, m}) \quad (1.1)$$

#### 1.4.1.2 Míhavý fotometr

Funguje na principu střídavého osvětlování zorného pole fotometru nejprve světlem měřeného, poté světlem zkoušeného zdroje. Fotometrická kostka je tvořena dvojkuželem, který se otáčí na hřídeli. Je nutno šikmo seříznout společnou základnu, čímž dosáhneme toho, že se dělicí hrana při rotaci míhá zprava doleva (a naopak). Každou stranu dvojkuželu osvětlujeme jiným zdrojem světla. Dosáhneme-li určitých otáček, splynou barvy světél a zůstane pouze míhání v jas. Abychom dosáhli vyrovnaného jas obou zdrojů, musíme nastavit správný poměr vzdáleností obou světelných zdrojů – v tom okamžiku pozorovatel přestane vnímat míhání.



Obr. 1-2. Řešení mihotavého fotometru [2]

#### 1.4.2 Fyzikální fotometrie

Lidský zrak je nahrazen v případě fyzikální fotometrie fyzikálními čidly. Nejčastěji používané čidlo je hradlový fotoelektrický článek (tzv. fotočlánek). Tím je eliminována subjektivnost, tedy závislost měření na dokonalosti zraku pozorovatele.

**Fotočlánky** – založeny na principu fotoelektrického jevu na přechodu mezi kovovou podložkou a tenkou vrstvou polovodiče. V současné době se nejčastěji využívá jako polovodič křemík a arzenid galia. Kovová destička bývá ze železa či z hliníku. Na polovodičovou vrstvu se přidává tenká vrstva stříbra, zlata nebo platiny.

**Vznik fotoelektrického jevu** – ozářením tenké vrstvy polovodiče, která je nanesena na kovové podložce, dojde ke vzniku rozdílu potenciálu mezi kovovou podložkou a vrstvou polovodiče. Elektrický proud je z článku odváděn pomocí kruhové elektrody, která je po celém obvodu článku.

### **Základní požadavky na fotočlánky:**

- 1) Průběh křivky spektrální citlivosti fotočlánku se musí co nejvíce shodovat s křivkou spektrální citlivosti lidského oka.
- 2) Využití kompenzačního zapojení, měříme-li proud nakrátko. To je důležité z hlediska zmenšení celkové chyby měření, jelikož je závislost fotoelektrického proudu na světelném proudu nelineární. Tato nelinearita se odstraňuje tak, že musíme dosáhnout nulového odporu vnějšího obvodu článku.
- 3) Únava selenových článků – u křemíkových fotočlánků není tak kritická.
- 4) Kalibrace fotočlánků na kolmý dopad světla. V případě šikmého dopadu dochází k chybě dle kosinusového zákona. Eliminace pomocí kosinového nástavce (kulový vrchlík z rozptýlného skla).

## **1.5 Měření konkrétních světelně technických veličin**

Máme-li nadefinované metody měření, víme, jaké mají být podmínky a přesnost měření, můžeme přistoupit k měření jednotlivých světelně technických veličin.

### **1.5.1 Měření osvětlenosti**

Nejčastější fotometrická úloha. Každá osvětlovací soustava musí dodržovat základní požadavky na úroveň a rovnoměrnost osvětlení. Přístroj, kterým můžeme osvětlenost měřit, se nazývá luxmetr. Ten se skládá z přijímače (křemíkový fotoelektrický článek), na kterém je kosinusový nástavec, dále z měřicího a vyhodnocovacího systému s digitálním nebo analogovým indikátorem.



*Obr. 1-3. Digitální luxmetr 5032 C (Gossen)[5]*

Dle ÚNMZ jsou luxmetry rozděleny do čtyř tříd přesnosti. Každá třída přesnosti obsahuje jedenáct druhů chyb  $f_I$  až  $f_{II}$ . Do těchto chyb jsou zahrnuty relativní chyby stupnice, spektrální chyby, chyby díky citlivosti fotočlánku na záření UV a IČ atd. Luxmetry, které spadají do tříd přesnosti 1 a 2 jsou využívány jako sekundární etalony nebo pro přesná laboratorní měření. Třída přesnosti 3 stačí na běžná provozní měření. Třída přesnosti 4 lze použít pro specifická provozní měření.

Měření pomocí luxmetru musí splňovat určitá pravidla, aby nedocházelo k chybám měření. Nesmíme překročit rozsah stupnice, nečteme hodnoty v rozsahu do první pětiny stupnice. Dále změny ve světelném toku způsobují změny napájecího napětí, teplota okolí, doba jejich provozu či znečištění světelně činných ploch svítidel a osvětlovaného prostoru. Další podrobnosti ohledně měření osvětlenosti nejsou předmětem této diplomové práce.

### 1.5.2 Měření jasu

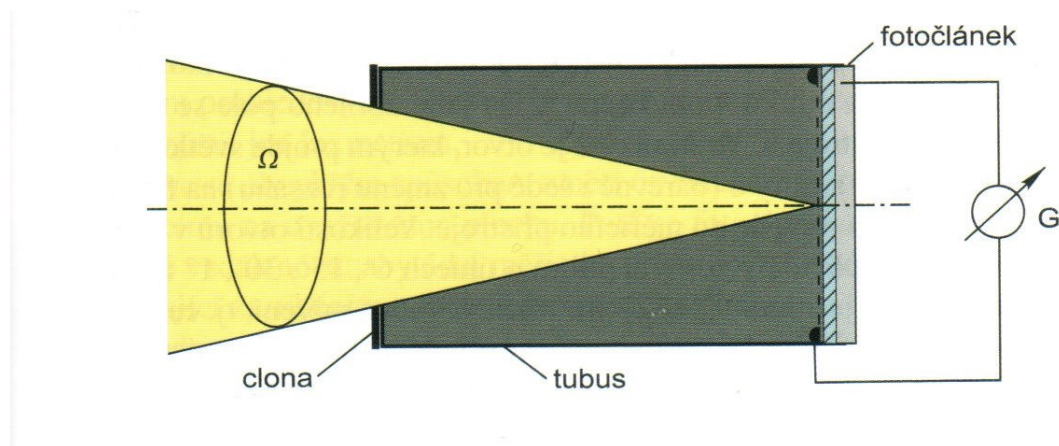
K měření jasu se dříve využívalo měření kolmé svítivosti přesně ohraničené a změřené plošky. Vymezíme plochu s rozptýleným povrchem (třeba o velikosti  $10 \text{ cm}^2$ ) a změříme dopadající svítivost ze vzdálenosti 300 až 500 mm. Toto je již minulostí. V současnosti využíváme vizuální nebo fyzikální jasoměry.

Vizuální jasoměr má v sobě nainstalovaný vlastní zdroj vytvářející jas, který se porovnává s jasnem neznámým v zorném poli jasoměru.

Objektivní (fyzikální) jasoměr se skládá z přijímače, na kterém je nasazen tubus. Tento tubus je trubka s černým vnitřkem, na jejímž začátku je clona s kruhovým otvorem. Ta nám zajistí vymezení prostorového úhlu ( $\Omega$ ), pod kterým nám dopadají paprsky z měřené plochy na přijímač, kterým bývá nejčastěji fotočlánek. Jedná se o nepřímou metodu měření, jelikož tímto způsobem měříme normálovou osvětlenost  $E_n$ . Výsledný jas se určuje ze vztahu pro střední jas plochy  $L$

$$L = \frac{E_n}{\Omega} \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lx}, \text{sr}) \quad (1.2)$$

Princip měření pomocí objektivního jasoměru je zobrazen na obrázku 1-4:



Obr. 1-4. Princip objektivního jasoměru [2]

Měřená plocha musí zahrnovat pouze povrch, jehož jas se posuzuje.

Ve vnitřním osvětlení měříme jas pozorovaného předmětu (detailu), jas ploch, které předmět bezprostředně obklopují, jas vzdálených ploch (stěny, podlahy, stropy atd.) a jas paprsků odražejících se od jasných částí povrchů (mohou ovlivnit zrakovou pohodu uživatelů).

Své nezastupitelné místo má měření jasu také ve veřejném osvětlení. Měří se průměrný jas povrchu vozovky.



Obr. 1-5. Digitální jasoměr LS-110 (Minolta)[6]

### **1.5.3 Měření svítivosti**

Svítivost se nikdy neměří přímo. K měření svítivosti se využívá subjektivní měření, kdy vizuálně porovnáváme jasy plošek pozorovaných v okuláru fotometru, jak tomu bylo v případě měření osvětlenosti u vizuální fotometrie. Dále lze využívat objektivní měření.

Chceme-li měřit svítivost pomocí vizuálního měření, máme v zásadě dvě možnosti. První možnost je porovnávat svítivost měřeného zdroje přímo s normálem svítivosti. Druhou možností je měření substituční metodou, kdy využíváme srovnávací světelný zdroj.

Využijeme-li fyzikálních měření, poslouží nám substituční metoda. Nejprve článek osvítíme etalonem svítivosti, poté zkoušeným zdrojem světla. Je nutno eliminovat vliv nelinearity proudu z fotočlánku. Toho lze dosáhnout konstantní osvětleností čidla. Měníme polohu zkoušeného zdroje, dokud není naměřený údaj stejný jako svítivost etalonu. Výslednou svítivost vypočítáme ze vztahu (1.1).

Měření se provádí na fotometrické lavici. Dále je třeba mezi zdroj a fotometr umístit stínící clony, jež nám zamezí dopad rozptýleného světla na čidlo.

### **1.5.4 Měření světelného toku**

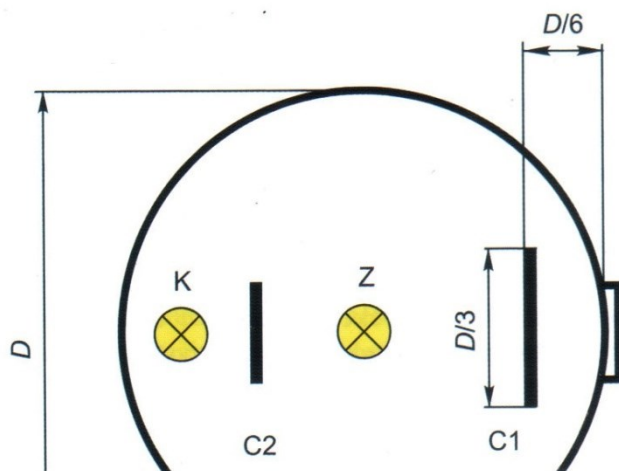
Opět se naskýtají dvě možnosti měření světelného toku. Lze jej určit z naměřených křivek svítivosti pomocí graficko-početních metod. Druhou možností je využití integrátoru.

Integrátor může mít tvar krychle či kvádra, ale nejčastěji se využívají integrátory ve tvaru koule. Tato koule je dutá, má na vnitřním povrchu bílý rozptýlný nátěr, který je charakteristický vysokým činitelem odrazu (0,75-0,85) a musí být barevně neselektivní. Uvnitř koule dochází k mnohonásobným odrazům. To způsobuje, že je výsledná osvětlenost ve všech bodech vnitřního povrchu koule stejná a je měřená fotočlánkem.



Na nátěr jsou využity barytové, zinkové nebo titanové běloby. Pro lepší obnovu nátěru se využívají dvě vrstvy. První vrstva je nanесena trvale, druhá je z nátěru rozpustném ve vodě.

Kulový integrátor má na vstupu okénko, ve kterém se nachází fotočlánek F zastíněný clonkou C<sub>1</sub>. Tím je zaručeno, že na fotočlánek nedopadne světlo přímo ze světelného zdroje. Zdroj Z se zavěšuje do středu koule.



Obr. 1-6. Uspořádání integračního kulového fotometru [2]

Postup měření je následující: umístíme do integrátoru normál světelného toku, který by měl mít přibližně stejný světelný tok jako je tok zkoušeného zdroje. Měřením normálu zjistíme konstantu  $k_i$  zařízení. Poté vyjmeme normál, vložíme zkoušený zdroj, změříme hodnotu světelného toku, vynásobíme tuto hodnotu konstantou a získáme konkrétní světelný tok měřeného zdroje.

V případě, že chceme měřit v kulovém integrátoru zdroje s většími nosnými částmi nebo je-li světelný zdroj umístěn ve svítidle, řídí se měření jinými pravidly díky chybě způsobené odstíněním a pohlcením části světelného toku. Využíváme korekční, žárovkový zdroj.

Během měření musíme dávat pozor na chyby měření. Jedny z vážných chyb během měření jsou způsobeny teplem. Teplota ovlivňuje nepříznivě vlastnosti fotočlátku. Dále se změní teplota v integrátoru při dlouhodobém měření. Je důležité pravidelně kontrolovat vlastnosti vnitřního nátěru, vstupní okénko musí mít vhodné umístění. Poslední důležitou informací je poloha měřeného zdroje. V jiné poloze se měří žárovky a vysokotlakové rtuťové výbojky (svíslá, patice směřuje nahoru), jiná poloha se využívá pro zářivky a vysokotlakové sodíkové výbojky (vodorovná poloha).

### 1.5.5 Měření integrálních charakteristik světelného pole

Tento druh měření se využívá v prostorech, kde chceme posoudit, zdali je prostor dostatečně prosvětlen a jak kvalitně můžeme vnímat trojrozměrné předměty. K měření světelného vektoru i skalárních integrálních charakteristik (kulové či válcové) využíváme kontrolní body. Ty se nacházejí ve vzdálenosti 1 m od povrchu stěny, v polovině její délky a v průměrné výšce oka sedící nebo stojící osoby. Pro sedící osobu to je 1,2 m, pro osobu stojící 1,5 m.

Integrální charakteristiky se měří pomocí přístrojů, které mají podobně jako luxmetr zvláštní nástavce. Tyto nástavce jsou vyrobeny z difúzně propouštějícího materiálu (plexisklo). Nástavec má tvar dle měřené integrální charakteristiky.

V praxi se měří vertikální osvětlenost v několika bodech (4 až 12) svislých rovin a ze změřených hodnot se stanovuje aritmetický průměr.

## 1.6 Nejistoty měření

Jelikož se jedná o nedílnou součást každého přesného měření, je nutno zde uvést veškeré skutečnosti související s nejistotami měření. Uvedme si některé důležité pojmy.

**Konvenčně pravá hodnota** – vztažná hodnota; jedná se o hodnotu sledované veličiny, která pro daný účel nahrazuje její pravou hodnotu (např. hodnota referenčního etalonu).

**Absolutní chyba měření** – rozdíl mezi naměřenou hodnotou a konvenčně pravou hodnotou veličiny.

**Chyba měření** – lze ji rozdělit na:

- a) Náhodná chyba – při opakovaných měřeních se mění nepředvídatelně
- b) Systematická chyba – při opakovaných měřeních se mění předvídatelně nebo zůstává stálá. Skládá se ze systematické chyby zařízení (měřidla) a ze systematické chyby metody. První zmíněnou chybu lze určit dle porovnání údajů s etalonem, což nazýváme kalibrace.

**Nejistota měření** – parametr přidružený k výsledku měření. Udává interval hodnot okolo výsledku měření, v jehož rozmezí se očekává výskyt pravé hodnoty měřené veličiny.

**Standardní nejistota  $u$**  – základní charakteristika nejistoty. Vyjadřuje se hodnotou směrodatné odchylky. Udává se v hodnotách měřené veličiny (absolutní standardní nejistota) nebo poměrem absolutní nejistoty a hodnoty příslušné veličiny (relativní standardní nejistota). Můžeme ji stanovit pro jednu možnou příčinu nejistoty následovně:

- a) Statistickou analýzou, kterou uplatníme na sérii naměřených hodnot, které vzniknou z opakovaných měření stejné veličiny. Nazýváme ji standardní nejistota typu A.
- b) Jiný způsob. Nazýváme ji standardní nejistota typu B.

**Standardní nejistota typu A** – neznáme příčiny, které ji způsobují. To lze eliminovat statistickým zpracováním naměřených údajů. Provedeme  $n$  opakovaných měření (podmínkou je, že jejich počet musí být  $n > 20$ ) určité veličiny  $X$ , čímž získáme  $n$  naměřených hodnot  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ . Provedeme aritmetický průměr  $\bar{x}$  z naměřených hodnot dle výrazu

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3)$$

Poté stanovíme standardní nejistotu  $u_{Ax}$  typu A. Udává se v procentech, vztahuje se ke zjištěnému aritmetickému průměru. Stanovíme ji pomocí výběrové směrodatné odchylky střední hodnoty dle rovnice

$$u_{Ax} = \frac{100}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\%) \quad (1.4)$$

**Standardní nejistota typu B** – známe příčiny chyb i určitou pravděpodobnost, v jaké se vyskytují okolo konvenčně pravé hodnoty. Příkladem takové chyby může být nepřesné umístění fotočlánku v kontrolním bodě. Odchylky lze rozdělit na dvě skupiny:

- a) Normální (Gaussovo) rozdělení – používá se v případě, že je sledovanou chybou zatížen malý počet měření.
- b) Rovnoměrné rozdělení – odchylky se nesoustředí v daném intervalu, ale chyba se vyskytuje kdekoli.

Chceme-li určit chybu nejistoty  $u_B$  typu B pro konkrétní zdroj, vycházíme z maximální velikosti chyby  $z_{max}$  (%). Tu zjistíme pomocí dokumentace: u fotočlánku může jít o největší předpokládanou odchylku v jeho nastavení. Nejistota  $u_B$  se vypočítá ze vztahu

$$u_B = \frac{z_{max}}{\chi} \quad (\%) \quad (1.5)$$

kde  $\chi$  je činitel daný pravděpodobností rozdělení uvažované chyby. Tento činitel může nabývat tří různých hodnot:

- 1)  $\chi = 2$  – kdy předpokládáme málo pravděpodobné překročení  $z_{max}$
- 2)  $\chi = 3$  – kdy předpokládáme nepřekročitelné  $z_{max}$
- 3)  $\chi = \sqrt{3}$  – pro rovnoměrné rozdělení

**Kombinovaná standardní nejistota  $u_C$  (%)** – stanovíme ji sloučením všech dílčích nejistot typu A i B, které jsme zjistili pro jednotlivé uvažované zdroje chyb. Platí vztah

$$u_C = \sqrt{(u_{A1})^2 + (u_{A2})^2 + (u_{A3})^2 + \dots + (u_{B1})^2 + (u_{B2})^2 + (u_{B3})^2 + \dots} \quad (1.6)$$

Nyní existuje určitá pravděpodobnost vyjádřená v procentech, která nám říká, že rozdíl mezi naměřenou a pravou (skutečnou) hodnotou nepřekročí určenou standardní nejistotu. Pro normální rozdělení má tato pravděpodobnost hodnotu 68,3%. Pro rovnoměrné rozdělení je tato hodnota nižší, 57,7%. V praxi jsou tyto hodnoty příliš nízké.

**Rozšířená standardní nejistota  $U$**  – používá se v případě, kdy chceme mít tuto pravděpodobnost vyšší. Stanovíme ji z výrazu

$$U = k_U u_c$$

kde  $k_U$  je činitel rozšíření (obvykle se volí  $k_U = 2$ ). Tím dosáhneme nejvyšší možnou pravděpodobnost, jelikož se pravá hodnota nachází v intervalu  $< \text{naměřená hodnota} - U, \text{naměřená hodnota} + U >$  při normálním rozdělení s pravděpodobností 95,5%, při rovnoměrném rozdělení dokonce s pravděpodobností 100%.

Veškeré hodnoty nejistot je třeba zaokrouhlit na dvě platné číslice s přednostním zaokrouhlením nahoru.

## **2 Parametry spektrometru Gooch and Housego OL 770VIS-LED/G-3 LED**

### **2.1 Představení přístroje**

Multikanálový spektrometr je vysokorychlostní spektrální měřicí zařízení pro měření v různých vědeckých a průmyslových aplikacích. Veškerá ovládací elektronika, vnitřní spektrograf a detektor se nacházejí v jediném přenosném přístroji. Přístroj je řízen pomocí počítače linkou RS-232 (sériový port) nebo pomocí rozhraní USB. Měřicí přístroj potřebuje ke své práci vlastní software, který obsahuje veškerá nastavení, měření, data a ovládací funkce. Software výše zmíněného přístroje je uživatelsky velmi přijatelný a zároveň je také kompatibilní s kancelářskými programy firmy Microsoft®, konkrétně s Microsoft® Word® a Microsoft® Excel®.

Přesná optika spektrografu má vysoké spektrální rozlišení a velkou přesnost při měření vlnových délek. Základní měření probíhají v rozsahu vlnových délek od 380 nm do 780 nm (spektrální citlivost lidského oka). Přístroj se nazývá spektrometr také díky tomu, že umí měřit v rozsahu vlnových délek v oblasti ultrafialového a infračerveného záření. Konektor optického vstupu do spektrografu je z optického vlákna.

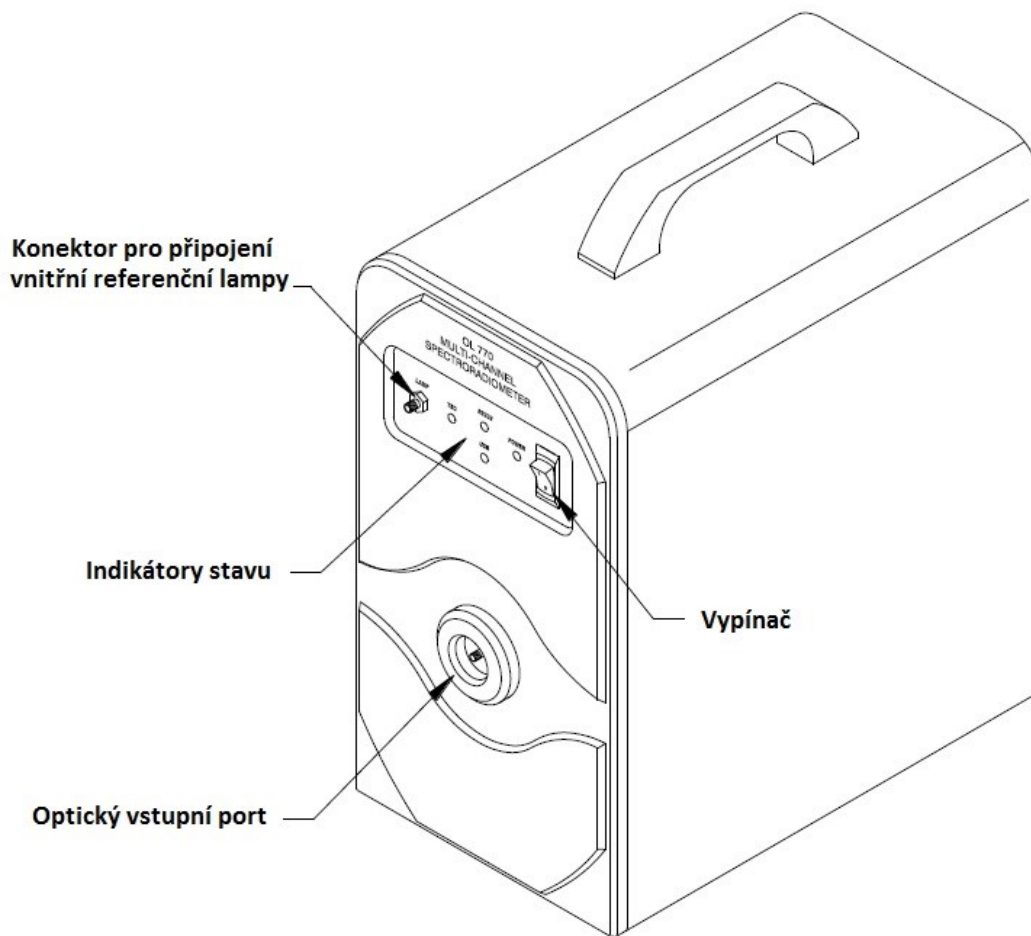
### **2.2 Popis přístroje**

Přístroj obsahuje spektrograf, termoelektricky chlazený CCD senzor záření (ve standardní konfiguraci), vnitřní referenční lampu, napájecí zdroj a ovládací elektroniku. Vše v přenosném provedení.

Spektrograf je továrně nastaven pro optimální spektrální měření a kalibrovaný dle normy CIE 127-1997, zabývající se měřením LED. Vnitřní lampa umožňuje uživateli provádět rutinní kalibraci celého systému a vytváření nových kalibračních souborů pro různé sady LED a držáku integrátoru.

Světlo z různých měřících přípravků (integrátoru, přijímače svítivosti a goniometru) je do přístroje přenášeno pomocí kabelu z optického vlákna. Tento kabel má základní délku 1 metr a tloušťce 3 milimetry. Firma Gooch & Housego je schopna dodat různé typy a velikosti optického kabelu pro konkrétní aplikace.

Přední panel přístroje obsahuje vypínač, LED indikátor statusu a zdířku pro připojení vnitřní referenční lampy. Dále obsahuje vstupní optický port.



Obr. 2-1. Spektroradiometr Gooch & Housego OL770 [4]

## 2.3 Měřené veličiny

Pomocí spektroradiometru a přídatných přípravků můžeme měřit tyto světelnotechnické veličiny:

- celkový zářivý tok (total spectral flux) (W/nm)
- celkový světelný tok (total luminous flux) (lm)
- čistota spektra (spectral purity) – činitel, který říká, jak přesné je výsledné spektrum oproti spektru očekávanému (nepřesnosti jsou způsobeny nelinearitou)
- spektrální šířka pásma (spectral bandwidth) (FWHM)
- špičková vlnová délka (peak wavelength)
- spektrální zářivost (spectral radiant intensity) (W/sr nm)
- průměrná svítivost LED (cd)
- dominantní vlnová délka (dominant wavelength)
- teplota chromatičnosti (color temperature)
- index podání barev (color rendering indices)

## 2.4 Filtr OL 770-15Q-A

Veškeré spektrální parametry měřené soustavou jsou závislé na vstupním filtru. Přiložený filtr ke spektrometrii vlastněnému VŠB-TUO má označení 15Q-A. Slouží k zúžení do pěti různých spektrálních pásem, ve kterých se daný světelný zdroj bude měřit. Vstupní parametry pro tři základní spektrální pásma (které je schopen měřit náš konkrétní spektrometr) jsou uvedeny níže.

### 2.4.1 Ultrafialové pásmo

Rozsah vlnových délek:	200 nm až 780 nm
Přesnost rozsahu:	$\pm 0,75$ nm
Optická šířka pásma:	3,5 nm
Spektrální rozlišení:	0,6 nm
Optická fokální vzdálenost:	140 mm

### 2.4.2 Viditelné pásmo

Rozsah vlnových délek:	380 nm až 780 nm
Přesnost rozsahu:	$\pm 0,5$ nm
Optická šířka pásma:	3,0 nm
Spektrální rozlišení:	0,4 nm
Optická fokální vzdálenost:	140 mm

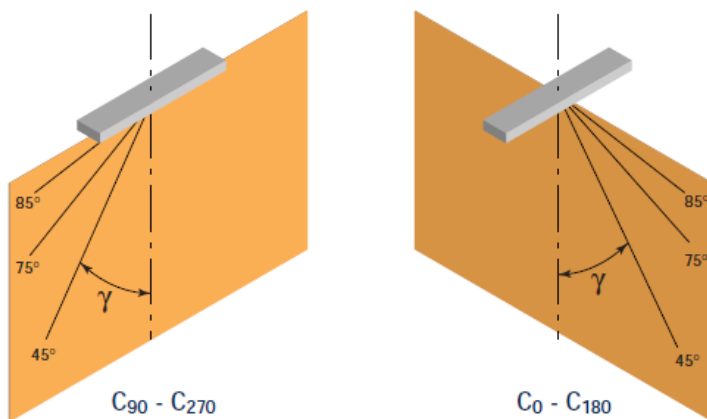
### 2.4.3 Infračervené pásmo

Rozsah vlnových délek:	380 nm až 1100 nm
Přesnost rozsahu:	$\pm 1,0$ nm
Optická šířka pásma:	5,0 nm
Spektrální rozlišení:	0,75 nm
Optická fokální vzdálenost:	140 mm

### 3 Měření křivek svítivosti pomocí spektroradiometru

#### 3.1 Křivky svítivosti

Křivky svítivosti slouží k popisu prostorového rozložení vyzařovaného světla ze svítidel a světelných zdrojů ve svítidlech umístěných. Vyjadřují svítivost svítidla v různých rovinách vyzařování. Pro eliminaci vlivu různých světelných toků různých zdrojů světla se pro křivky svítivosti světelná intenzita v jednotlivých směrech udává v jednotkách  $\text{cd.klm}^{-1}$ . Soustava měřících rovin, která je používána nejčastěji, nese pojmenování C- $\gamma$ . Důležité je, aby osa rovin byla ve středu optické části svítidla.



Obr. 3-1. Základní sestavy měření křivek svítivosti [7]

Na obrázku 3-1 je vyobrazeno měření zářivkového tělesa pomocí dvou vzájemně kolmých rovin. Měříme-li kolmo na rovinu vyzařování, jedná se o případ vpravo, tedy  $C_0$  až  $C_{180}$  stupňů. Budeme-li postupovat v ose zdroje, jedná se o případ vlevo, tedy  $C_{90}$  až  $C_{270}$ .

#### 3.2 Základní podmínky měření

Chceme-li měřit jakékoliv svítidlo, musíme dosáhnout toho, že se bude jevit jako bodový zdroj. Jedná se o určité zjednodušení, které lze uplatnit v případě, že bude tzv. „fotometrická vzdálenost“, neboli vzdálenost čidla luxmetru od svítidla, minimálně 6-8x větší, než je největší rozměr optické části svítidla. Bez této podmínky nemůže být měření křivek svítivosti provedeno!

Měření svítivosti se provede pomocí fyzikální fotometrie, o které již byla zmínka v první kapitole této diplomové práce. Jako fotometr (receptor) poslouží fotočlánek luxmetru. Celkový světelný tok nelze změřit přímo, je třeba jej přepočítat dle základních vztahů uvedených u konkrétní praktické úlohy v další kapitole.

Další podmínkou je nastavení světelného zdroje přesně do osy měřícího zařízení. Jakmile budeme otáčet svítidlem, musíme dodržet podmínky, kdy je světelný střed zdroje umístěn do středu otáčení.

Výsledné hodnoty svítivosti v jednotlivých směrech jsou vynášeno v polárních souřadnicích.



### 3.3 Goniofotometr

Jedná se o speciální přístroj, který otáčí svítidlem v námi zvoleném kroku potřebném pro měření křivek svítivosti. Hlavním požadavkem na kvalitní goniofotometr je dostatečně tuhá konstrukce, jelikož může během rotace docházet k deformaci nosných částí, což má za následek nekontrolovatelné chyby měření. Pro měření úloh v této diplomové práci bude využita sestava otočný zdroj - pevný fotometr.

### 3.4 Využití spektrometru namísto luxmetru

Jaké jsou výhody při měření křivek svítivosti pomocí spektrometru namísto luxmetru je možno vysvětlit na prvním příkladu.

Nejprve je třeba uvést základní sestavu pro měření křivek svítivosti. Sestava se skládá ze svítidla, polohovacího zařízení a luxmetru umístěného v definované vzdálenosti. Svítidlo je nasměrováno tak, aby hlavní světelný tok mířil přímo na luxmetr, hlavní osa svítidla se tedy bude shodovat s osou luxmetru. Tím dosáhneme nulového, základního úhlu.

V této sestavě změříme pouze osvětlenosti zdroje v jednotlivých úhlech, ze kterých je možno sestavit křivky svítivosti. Co můžeme změřit v případě, že místo luxmetru umístíme zmíněný spektrometr?

Díky spektrometru můžeme změřit kromě hodnoty osvětlenosti také spektrální charakteristiku. Jedna hodnota, kterou bychom získali z luxmetru, je rozložena na více hodnot, ze kterých je možno sestavit spektrální charakteristiku. To nám umožňuje detekovat chybu způsobenou hranou čočky, kde dochází k lomu světla. Následkem tohoto jevu lze říci, že úhel odrazu je frekvenčně závislý. Tuto závadu lze eliminovat přesnějším vybroušením čočky.

### 3.5 Aplikace v praxi

Světelný zdroj se špatně vybroušenou čočkou je možno rozeznat jednoduchým způsobem.

Mějme světelný zdroj vydávající bílé světlo, například světlomet automobilu. Tento zdroj je zatížen výše zmíněnou chybou. Posvítíme-li takovým zdrojem na bílou stěnu, můžeme vidět, že na okrajích světelného paprsku není pouze bílá barva, která je přítomná ve středu paprsku, ale také další barvy ze spektra viditelného záření.

Detekovali jsme chybu a je nutné ji analyzovat a změřit. K tomu nám poslouží spektrometr. Změříme křivky svítivosti a spektrální charakteristiky v jednotlivých bodech, čímž přesně určíme, které složky barevného spektra jsou nežádoucí. Poté je na výrobci optiky, aby případnou chybu odstranil.

Proč je nutno tuto chybu odstranit? V případě, že proti nám pojede automobil s nainstalovaným světlometem zatíženým touto chybou, může dojít k nežádoucím, nepříjemným a matoucím jevům v nevhodném okamžiku, kdy nás tento automobil bude míjet.

## **4 Návrh laboratorní úlohy pro měření křivek svítivosti hlubokozářičů**

### **4.1 Úvod**

Na VŠB-TUO se nachází starší přístroj na měření křivek svítivosti sestavený za pomoci doktorandů. Tento přístroj má možnost měřit křivky svítivosti pouze s krokem  $5^\circ$ . Pro přesnější měření proto vznikla potřeba měřit svítidla s přesnějším krokem. K tomu poslouží právě spektrometr a goniofotometr od firmy Gooch & Housego, který má možnost měřit s krokem až  $0,01^\circ$ , jak je dokázáno v měřících úlohách níže.

### **4.2 Zadání laboratorní úlohy**

Základní funkcí spektrometru je měření křivek svítivosti s vysokou přesností, proto byla tato úloha zvolena. Kompletní syllabus určený pro studenty, kteří budou měřit pomocí spektrometru, je obsažen v Příloze č. 4.

Zadání laboratorní úlohy zní takto: „Pomocí spektrometru značky OL770 od firmy Gooch & Housego změřte křivky svítivosti daného světelného zdroje (hlubokozářič L2-HZ26). Měření proveďte ve jmenovitém vyzařovacím úhlu, který je v tomto případě  $26^\circ$ . Dále proveďte měření spektrálních charakteristik v přímém směru a na okraji vyzařovací charakteristiky.“

### **4.3 Příprava optického systému**

Měření bude probíhat v místnosti nazvané Laboratoř světelné techniky v Ostravě-Porubě přímo v areálu VŠB-TUO. Před začátkem samotného měření je potřeba připravit optický systém. Jak připravený systém a laboratoř vypadá je možno vidět na fotografiích v Příloze č. 1.

Celý optický systém se skládá z fotometrické lavice, což je v našem případě ocelový profil tvaru H (rovná kolejnice) přes celou délku místnosti, připevněná ke zdi. Před začátkem měření bylo třeba kolejnici pevněji uchopit ke zdi pomocí dalších jistících prvků, jelikož nebyla před měřením dokonale uchycena a mohlo dojít k chybě měření díky pohybu kolejnice.

Dále je systém složen z kulového integrátoru, který nám poslouží jako měřící prvek k vyhodnocení svítivosti v jednotlivých úhlech. Žádné jiné příslušenství k měření této veličiny nebylo v soupravě od firmy Gooch & Housego dodáno. Kulový integrátor je umístěn na pomocné tyči, která jej vyzvedne nad kolejnici do potřebné měřené výšky. Tuto tyč bylo nutno opět před začátkem měření řádně podepřít a připevnit ke kolejnici, jelikož se i při nepatrném doteku kulový integrátor vychýlil z optické osy.

Nejdůležitějším prvkem optického systému je samotné svítidlo. Jedná se o hlubokozářič od firmy L2LED s.r.o, který byl sestaven autorem této diplomové práce. Skládá se z LED čipu Citizen CLL042. Parametry tohoto čipu jsou uvedeny v Příloze č. 3. Tento čip je připevněn k základně z hliníkového profilu. Svítidlo musí splnit podmínku zúžení vyzařovacího úhlu, aby jej bylo možno uznat jako hlubokozářič. K tomu se jako optické části svítidel používají čočky nebo směrové reflektory. Pro konstrukci měřeného hlubokozářiče byl použit reflektor firmy LEDIL, typ C12597 včetně bajonetového držáku k použitému LED čipu. Parametry reflektoru jsou uvedeny v Příloze č. 2. Toto svítidlo bylo zvoleno k měření, protože jako jediné z jednoduše dostupných svítidel splňovalo definici hlubokozářiče.

Svítidlo bude připevněno pomocí šroubů a matic na goniometr, dodaný také firmou Gooch & Housego. Tento goniometr je připojen pomocí LAN kabelu ke stolnímu počítači, o jehož rozhraní bude zmínka níže. Již během prvních pokusných měření bylo zjištěno, že v určitých polohách dochází ke stínění světelného zdroje ramenem a základovou deskou goniometru. Tento problém se při měření této konkrétní úlohy neprojevil, jelikož se jedná o krajní polohy goniometru, do kterých se při měření hlubokozářičů nezachází. Problémy to způsobí při měření světelných zdrojů, které mají širokou křivku svítivosti a budou se měřit v celém rozsahu, tedy 180° horizontálně i vertikálně. V tomto optickém systému nemá problém řešení a návrh jiného optického systému není předmětem této diplomové práce.

Posledním prvkem, který pouze zprostředkovává samotné měření, je stolní počítač. Instalace potřebných programů proběhla za pomoci zaměstnanců české pobočky zastupující prodej produktů firmy Gooch & Housego. Instalace je také velmi podrobně, krok po kroku, popsána v manuálech přiložených k spektrometri. V tomto počítači jsou nainstalovány dva důležité programy, o kterých bude zmínka u samotného postupu měření.

#### **4.4 Optická osa**

Před samotným měřením je potřeba se ujistit, že je optická osa svítidla a měřicího přístroje (vstupního otvoru kulového integrátoru) totožná. Tento předpoklad byl splněn přesným nasměrováním hlubokozářiče do otvoru kulového integrátoru, čehož bylo dosaženo pomocí laserového paprsku. Kulový integrátor na tyčovém podstavci a hlubokozářič byly umístěny do stejné výšky. Vzdálenost těchto dvou přístrojů byla zvolena  $l = 2,5$  m. Případné odchylky je možno zkorigovat dvěma způsoby. Jedna z možností je softwarová úprava naměřených hodnot. V tomto případě jsme zvolili variantu přesného nastavení goniometru pomocí inicializačních funkcí ovladače goniometru.

#### **4.5 Vliv okolního prostředí**

##### **4.5.1 Ideální prostředí**

Velmi důležitým aspektem každého měření světelně technických veličin je vhodné okolní prostředí, které se nachází v oblasti optického systému. V ideálním případě by se mělo jednat o velkou místnost bez oken obdélníkového či čtvercového tvaru, která má po celém obvodu nízko odraznou plochu, například černé matné sametové závěsy, které mají vysokou pohltivost odraženého světla. Fotometrická lavice by se měla nacházet v prostorové ose místnosti tak, aby vzdálenost od všech odrazných ploch byla stejná.

Dále se v místnosti nesmí nacházet žádné předměty, které by mohly narušit průběh měření odrazností svého povrchu, tedy požadavek na dokonale uklizené pracoviště. Podlaha i strop by měly být v ideálním případě také pokryty černým sametem. V celé místnosti se mohou nacházet pouze prvky optického systému.

Během měření do místnosti nesmí vstupovat žádné osoby. Na dveřích musí být umístěno upozornění o probíhající měření. Tento požadavek v sobě nese přesně dané kompetence pro jednotlivé osoby. Dále by se mimo místnost měl nacházet také počítač vyhodnocující měření, jelikož svým světlem z monitoru může ovlivňovat průběh měření.

### **4.5.2 Reálná situace**

V prostředí světelné laboratoře nebylo možno přesně splnit ani jeden z teoretických požadavků. Nachází se zde velké množství předmětů, které mohou mít negativní vliv na výsledky měření, jako například skříně, stoly, úložné prostory a nevhodně uskladněné kartónové krabice, které nebylo možno v době měření přemístit jinam.

Rozměr místnosti a umístění optického systému je zvoleno opět velmi nevhodně. Fotometrická lavice se nachází v levé části místnosti, ve vzdálenosti 1,5 metru od levé stěny. Pravá stěna je vzdálena od fotometrické lavice přibližně 3 metry. Částečného řešení tohoto problému bylo dosaženo pomocí černého závěsu ve vzdálenosti 1,5 metru. Částečně z toho důvodu, že to není závěs z černého sametu, nýbrž lehké černé látky, která má částečnou odrazivost světla.

Byla zjištěna vysoká odraznost stropu, který je natřen lesklou černou barvou místo matného nátěru. Podlaha je potažena povrchem z gumy, který má malé kruhové výstupky rovnoměrně po celém obvodu. Tento povrch je možno použít, jelikož světlo neodráží a vhodným způsobem rozptyluje. Nakolik se podlaha blíží ideálu, je velmi těžké posoudit.

Do místnosti je volný přístup, jelikož slouží pro potřeby doktorandů. Před každým měřením bylo nutno upozornit přítomný personál o probíhajícím měření, jelikož na chodbě svítí světla, které by mohly ovlivnit měření. Dále bylo nutno dosáhnout naprosté tmy, čehož opět nebylo možné docílit díky vyzařování monitoru počítače vyhodnocujícím měření. Po zkušebním měření bylo zjištěno, že se jedná o vliv téměř zanedbatelný a pouze postačí přemístit monitor mimo okolí optického systému.

Pro budoucí měření laboratorních úloh je doporučeno přemístit celý optický systém do vhodnější místnosti. Splnit požadavky na téměř ideální prostředí není tak těžké dosáhnout, jelikož se podobné místnosti běžně v laboratořích určených pro měření světelně technických veličin nacházejí.

K účelu návrhu laboratorní úlohy na měření světelně technických veličin tato místnost byla shledána jako postačující. Předměty v místnosti byly zakryty černou látkou, monitor a celý vyhodnocující aparát umístěný na stole byl celý přemístěn doprostřed místnosti mimo optický systém.

## **4.6 Doporučený postup při příchodu do laboratoře**

Při příchodu do laboratoře je nejprve zapotřebí připravit optický systém, jak bylo zmíněno výše. Po správném umístění všech prvků soustavy je třeba nechat zahořet hlubokozářič, upozornit personál o probíhajícím měření a zapnout počítač. Před samotným měřením je potřeba zhasnout v místnosti.

Během instalace celého systému včetně obslužných programů se vyskytly problémy technického rázu týkající se kompatibility mezi počítačem a optickým systémem. Bylo stanoveno přesně pořadí, v jakém je třeba zapnout jednotlivé přístroje, jinak docházelo k náhlému selhání přidruženého počítače. Přístroje je nutno zapínat v pořadí: počítač, filtr, spektrometr OL770 a nakonec goniometr. Nyní je třeba spustit program určený k měření křivek svítivosti. Opět se vyskytly problémy při samotném spouštění, jelikož samotné načtení uživatelského rozhraní trvá velmi dlouho, řádově desítky minut. Řešení tohoto problému není známo, přestože proběhla konzultace s technikem dodavatelské firmy, který nabídl několik různých řešení, včetně obnovení posledního bodu zálohy, který na počítači chybí.

Po spuštění se program zeptá uživatele, zdali si přeje kalibraci goniometru do výchozí, nulové polohy. Tento krok je nutno provést. Goniometr se sám natočí do krajních poloh v horizontálním i vertikálním směru a nastaví se sám do výchozí pozice. Během otáčení je potřeba sledovat přívodní kabely ke goniometru a napájecí kabel ke světelnému zdroji, může totiž dojít k zaseknutí, namotání nebo utržení kabelů.

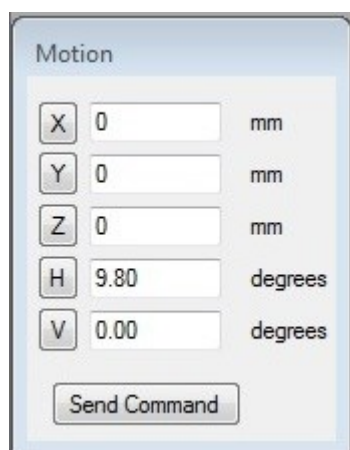
Máme-li splněny všechny body obsažené v této kapitole, můžeme přistoupit k samotnému měření.

## 4.7 Uživatelské prostředí programu určeného k ovládání goniometru

Po spuštění programu se objeví uživatelské rozhraní, které nám umožňuje pohybovat s goniometrem v reálném čase nebo nastavit automatický pohyb goniometru v námi vymezených souřadnicích (algoritmus pohybu, v programu nazvaný skript). Dále se zde nachází celkové nastavení programu a počátečních podmínek měření. Program umožňuje nastavení hodnot, které nám má optický systém změřit a následně zapsat do programu Microsoft® Excel®.

Tyto základní úkony je možno provést v příslušných tabulkách, které jsou podrobně popsány v další podkapitole.

### 4.7.1 Pohyb v reálném čase



The screenshot shows a window titled "Motion" with a light blue background. It contains five input fields, each with a label in a small box to its left: X, Y, Z, H, and V. The X, Y, and Z fields are set to "0" and are followed by "mm". The H field is set to "9.80" and is followed by "degrees". The V field is set to "0.00" and is followed by "degrees". At the bottom of the window is a button labeled "Send Command".

Axis	Value	Unit
X	0	mm
Y	0	mm
Z	0	mm
H	9.80	degrees
V	0.00	degrees

Obr. 4-1. Tabulka pro pohyb goniometru v reálném čase

Tato tabulka nám zobrazuje aktuální polohu goniometru. Písmeno „H“ nám vyjadřuje, do kterého stupně je goniometr natočený v horizontální (vodorovné) poloze. Písmeno „V“ podobně jako písmeno H vyjadřuje stupeň natočení goniometru, tentokrát ve vertikální (svislé) poloze. Tabulka je interaktivní a můžeme ručně nastavit úhel natočení goniometru dle příslušných kláves End a Home pro horizontální pozici, PgUp a PgDn pro pozici vertikální.

### 4.7.2 Počáteční podmínky

Instrumentation

Instrument

Min Int Time(s) 0.02 ☐ Auto Dark ☐ Auto Integration

Max Int Time(s) 60 # Avg 1

Integration(s) 0.02 Filter Open

Cal File:  ... Clear

Trig Mode: Instantly Trigger Caption:

Trig Input: Pin 3

Trig Wait 0

Take Measurement Send OL770 Setup To Script

Obr. 4-2. Tabulka pro počáteční podmínky měření

V této tabulce jsou dvě velmi důležité počáteční podmínky – první z nich je kalibrace kulového integrátoru pomocí funkce „Auto Dark“, která musí být potvrzená.

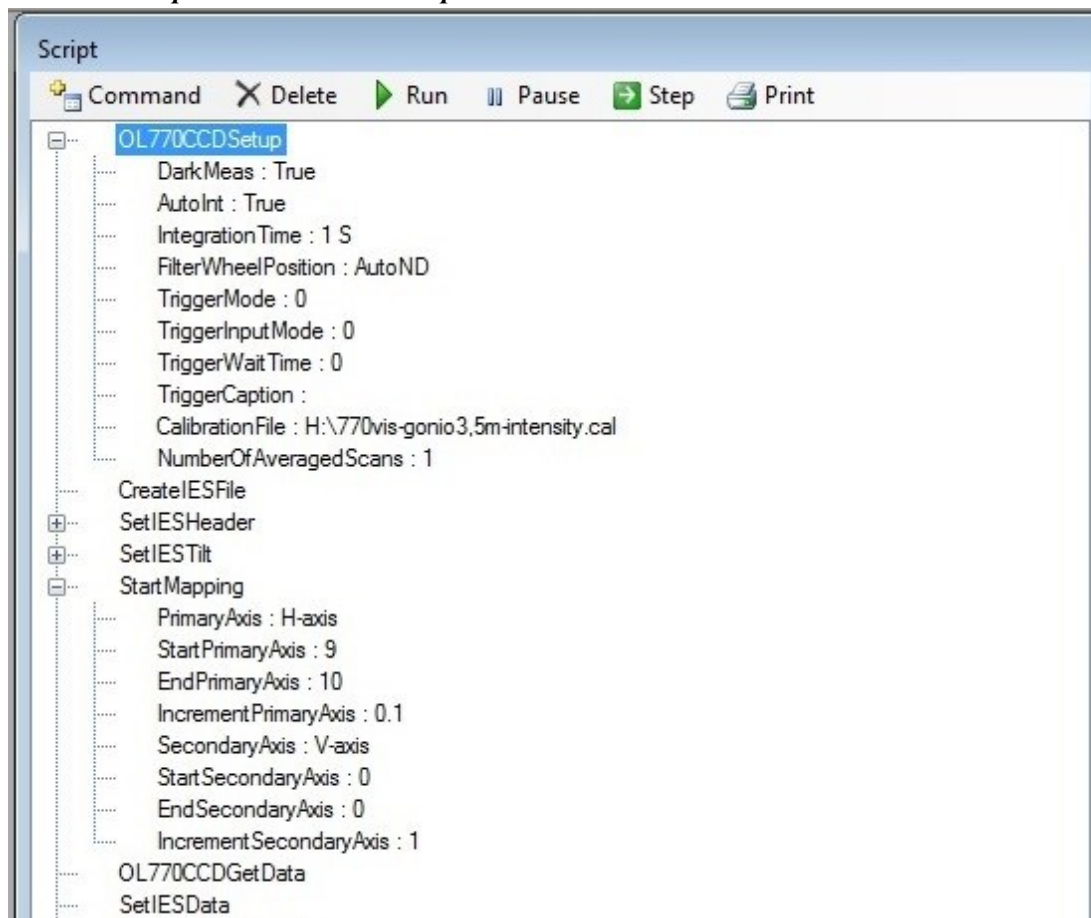
Druhou počáteční podmínkou je integrační čas – během měření křivek svítivosti hlubokozářiče byl nastavený automatický integrační čas, tedy zaškrtnuta kolonka „Auto Integration“. Dle uvážení měřitele je možnost si vybrat minimální a maximální integrační čas.

### 4.7.3 Skript

Tato hlavní tabulka, umístěná uprostřed celého rozhraní, nám umožňuje naprogramovat celý proces měření pomocí goniometru. Tento proces se nazývá skript. Ten je rozdělený do bodů, které goniometr postupně vykonává. Skript nám říká, s jakým nastavením bude goniometr měřit, v jakých souřadnicích se bude pohybovat a jaké hodnoty zapíše do programu Microsoft® Excel®. Celé rozhraní má podobu programovacího jazyka.

Tabulka je velmi rozsáhlá, z důvodu přehlednosti je tedy rozdělena na dvě části.

#### 4.7.3.1 Skriptovací tabulka – část první



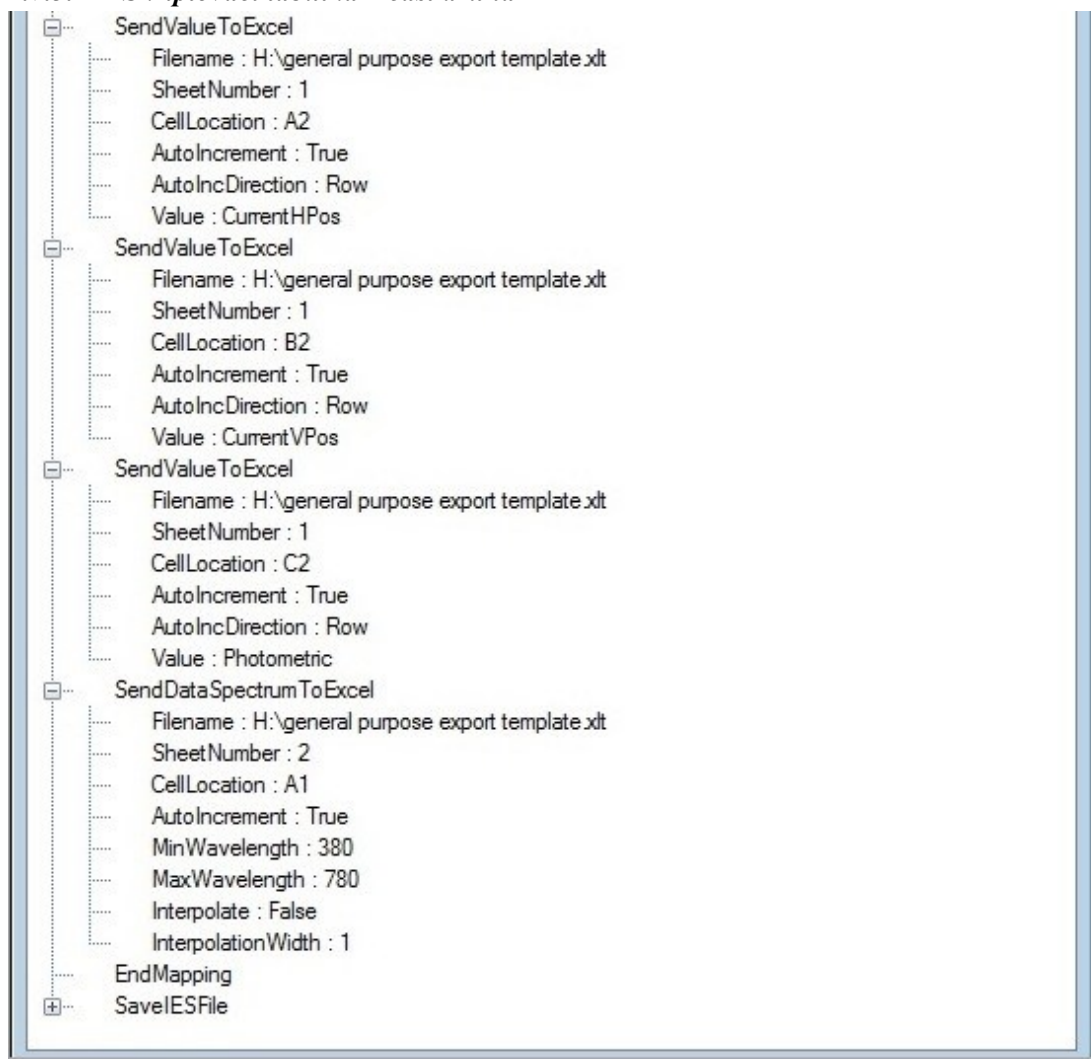
Obr. 4-3. Tabulka pro nastavení skriptu programu (část první)

První část tabulky (obr. 4-3) má v horní části úzkou lištu, která umožňuje pomocí interaktivních tlačítek dávat příkazy optickému systému. „Command“ přidává do skriptu nový bod zvolený dle uživatele, „Delete“ smaže uživatelem označený bod ve skriptu, „Run“ spouští skript, čímž uvádí do pohybu goniometr, přičemž tlačítko „Pause“ skript zastaví. Tlačítko „Step“ vykonává algoritmus postupně krok za krokem a tlačítko „Print“ slouží k vytisknutí celého algoritmu (třeba pro případy fyzického zálohování nastavení). Tyto tlačítka nebyla využívána vůbec.

Pod lištou se nachází první bod nazvaný „OL770CCDSetup“, což je souhrn nastavení provedeného v tabulce počátečních podmínek. Dále je třeba vybrat správný kalibrační soubor. Následuje několik zálohovacích a spouštěcích kroků pro spuštění goniometru, které nelze měnit a goniometr je musí vykonat.

Další důležitý bod je „StartMapping“. Uživatel si může zvolit, která z os bude primární či sekundární. Pro přehlednost je zvolena jako primární osa horizontální a jako sekundární osa vertikální. V kolonce „StartPrimaryAxis“ si zvolí počáteční hodnotu úhlu, v další kolonce „EndPrimaryAxis“ si zvolí konečnou hodnotu úhlu a v poslední kolonce určené pro primární osu „IncrementPrimaryAxis“ si zvolí krok (úhel), o který se bude goniometr v daném směru posouvat. Goniometr splní uživatelem zadaný pohyb v osách automaticky po odstartování programu tlačítkem „Run“.

#### 4.7.3.2 Skriptovací tabulka – část druhá



SendValueToExcel	Filename : H:\general purpose export template.xlt
	SheetNumber : 1
	CellLocation : A2
	AutoIncrement : True
	AutoIncDirection : Row
	Value : CurrentHPos
SendValueToExcel	Filename : H:\general purpose export template.xlt
	SheetNumber : 1
	CellLocation : B2
	AutoIncrement : True
	AutoIncDirection : Row
	Value : CurrentVPos
SendValueToExcel	Filename : H:\general purpose export template.xlt
	SheetNumber : 1
	CellLocation : C2
	AutoIncrement : True
	AutoIncDirection : Row
	Value : Photometric
SendDataSpectrumToExcel	Filename : H:\general purpose export template.xlt
	SheetNumber : 2
	CellLocation : A1
	AutoIncrement : True
	MinWavelength : 380
	MaxWavelength : 780
	Interpolate : False
	InterpolationWidth : 1
EndMapping	
SaveIESFile	

Obr. 4-4. Tabulka pro nastavení skriptu programu (část druhá)

Druhá část tabulky slouží k nastavení hodnot, které bude uživatelské rozhraní posílat do programu Microsoft® Excel®. Jméno souboru, číslo stránky, číslo tabulky, automatický skok na další řádek, směr zápisu a výslednou hodnotu (například „CurrentVPos“ zapíše hodnotu úhlu vertikální polohy, ve kterém se goniometr v daném okamžiku nacházel). Tento zápis bude srozumitelnější během představení výsledků a naměřených hodnot.

**Důležité upozornění pro práci s uživatelským rozhraním – desetinná čísla je důležité oddělit od celých čísel nikoliv čárkou, nýbrž tečkou! Jinak dojde k selhání programu!**

#### 4.7.4 Nulová poloha goniometru

V případě, že se svítidlo a měřicí přístroj nenachází přesně v optické ose, což lze zjistit z prvních měření, je důležité zjistit úhel, o kolik stupňů je osa vychýlená a následně chybu opravit nastavením nulové pozice goniometru přímo v uživatelském rozhraní. K tomu poslouží tabulka „Configure OL 700-MPXY“ vyobrazená na další straně. Tuto tabulku můžeme najít v záložce „Setup“ vlevo nahoře. Chyba v číslování (škola vlastní spektrometr OL770) je způsobena využitím jiného manuálu, rozhraní je ovšem shodné.



Configure OL 700-MPXY

X-Axis	Y-Axis	Z-Axis	H-Axis	V-Axis
<input checked="" type="checkbox"/> Enable	<input checked="" type="checkbox"/> Enable	<input checked="" type="checkbox"/> Enable	<input checked="" type="checkbox"/> Enable	<input checked="" type="checkbox"/> Enable
Acceleration/ Deceleration 15	Acceleration/ Deceleration 15	Acceleration/ Deceleration 15	Acceleration/ Deceleration 10	Acceleration/ Deceleration 10
Velocity 30	Velocity 30	Velocity 30	Velocity 20	Velocity 20
Offset 100	Offset 100	Offset 50	Offset -130	Offset -130

Communications

Connect  COM or IP Address

Home Axis

Stop Controller

OK

Cancel

Obr. 4-5. Tabulka pro základní nastavení goniometru

V této tabulce se nachází nastavení hodnoty „Offset“ pro horizontální a vertikální osu. V případě, že dojde během prvních měření k nesymetrii, je zapotřebí zjistit, jak velký je úhel způsobující tuto nesymetrii a následně podle odchylky upravit tyto hodnoty. Po úpravě hodnot je potřeba opět provést kontrolní měření, je-li všechno v pořádku.

Příklad: Offset horizontální osy byl nastaven na hodnotu  $-127,315^\circ$ , odchylka úhlu byla změřena přibližně  $-2^\circ$ . Odchylka se přičetla k celkovému offsetu, takže byla výsledná hodnota  $-129,315^\circ$ . Po kontrolním měření se opět objevila nesymetrie, i když mnohem menší – stačilo umazat hodnoty za desetinnou čárkou, čímž se změnila hodnota offsetu na  $-129^\circ$ . Další výsledky měření ukázaly, že nesymetrie téměř zmizela. Toto nastavení offsetu bylo provedeno i pro osu vertikální.

Popis uživatelského rozhraní je nyní kompletní a je možno přistoupit k hlavní kapitole této diplomové práce, tedy ke konkrétnímu příkladu měření křivky svítivosti hlubokozářiče. Tyto úlohy budou doplněny měřením spektrálních charakteristik a zkušebním měřením, s jak malým krokem může celý optický systém měřit.

## 5 Příklad měření a vyhodnocení křivky svítivosti hlubokozářiče realizovaného pomocí LED

Je-li správně připraven optický systém, hlubokozářič L2-HZ26 je po zahoření, prostředí kolem optického systému je uvedeno do nejlepšího možného stavu a program pro ovládání goniometru je spuštěn, můžeme přistoupit k samotnému měření a vyhodnocení křivky svítivosti hlubokozářiče realizovaného pomocí LED.

Celý příklad měření bude rozdělen do několika samostatných úloh, které vedou k celkovému řešení a slouží jako ukázka procesu hledání chyb a nesrovnalostí měření až k relevantním výsledkům.

### 5.1 Úloha č. 1 – Kontrolní měření

Měření můžeme prohlásit za relevantní pouze v případě, je-li opakovatelné. V prvních dnech po seznámení se s přístrojem, správným nastavením optického systému a po eliminaci základních systémových chyb měření se nepovedlo udělat ani jedno správné, opakovatelné měření. To bylo způsobeno špatně nastaveným integračním časem. První naměřené hodnoty, pro goniometr nastavený do nulové polohy, bez jakéhokoliv pohybu, a s konstantním integračním časem nastaveným uživatelem, vypadaly takto:

*Tabulka č. 5.1 – Hodnoty intenzity v nulovém bodě, definovaný integrační čas*

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
0	0	1232,615416
0	0	1234,322457
0	0	1240,685522
0	0	1228,077037
0	0	1245,748591
0	0	1240,226708
0	0	1223,373868
0	0	1234,300973
0	0	1233,362065
0	0	1223,523646

V okamžiku, kdy byl program nastaven na automatickou integraci, tyto odchylky zmizely a hodnoty se ustálily – měření je opakovatelné.

## 5.2 Úloha č. 2 – Maximální intenzita (optický střed)

Je-li dosaženo opakovatelnosti měření, je potřeba najít optický střed hlubokozáříče. Ten zjistíme jediné tak, že najdeme nejvyšší intenzitu v úzkém okolí středu. K tomu poslouží měření intenzity ve vertikální poloze od  $-4^\circ$  do  $4^\circ$ . Zkrácený zápis pro tento krok bude vypadat takto: V = ( $-4^\circ$  do  $4^\circ$ ). Zároveň bude změřena intenzita v horizontální poloze, opět od  $-4^\circ$  do  $4^\circ$ , zkrácený zápis: H = ( $-4^\circ$  do  $4^\circ$ ). Krok byl zvolen  $2^\circ$ . Výsledky měření odhalily, že se střed nachází v souřadnici (0,0) a zároveň se může nacházet v souřadnici (-2,2). Podrobné výsledky měření jsou zapsány v tabulce č. 5.2.

Tabulka č. 5.2 – Hledání maximální intenzity

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
-4	-4	4822,461223
-2	-4	4827,352574
0	-4	4646,532517
2	-4	4170,668004
4	-4	3458,958956
4	-2	3989,843566
2	-2	4723,085689
0	-2	4999,300343
<b>-2</b>	<b>-2</b>	<b>5048,040304</b>
-4	-2	5030,92077
-4	0	5028,703036
-2	0	5037,034683
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5048,91165</b>
2	0	4924,629
4	0	4349,409412
4	2	4438,719204
2	2	4950,583476
0	2	5040,592098
-2	2	5034,711012
-4	2	5033,588664
-4	4	5035,44909
-2	4	5039,711178
0	4	5026,01338
2	4	4884,332665
4	4	4284,920502
-4	-4	4822,418004
-2	-4	4829,313728
0	-4	4646,274869

### 5.3 Úloha č. 3 – Vyzařovací úhel

Během konstrukce hlubokozářiče potřebujeme ověřit, jaký má reflektor vyzařovací úhel. Dokumentace k reflektoru uvádí různé hodnoty pro různé LED čipy. Úkolem v třetí úloze je najít mezní úhly v obou osách, ve kterých poklesne intenzita na poloviční hodnotu. Tím je možno zjistit, jaký má hlubokozářič vyzařovací úhel

Goniometr se nastavil na pohyb  $V = (-40^\circ \text{ do } 40^\circ)$  a  $H = (-40^\circ \text{ do } 40^\circ)$  s krokem  $10^\circ$ . Dle výsledků se hranice úhlu vyzařování skutečně nachází v rozmezí mezi  $10^\circ$  a  $20^\circ$ , je tedy zapotřebí najít ho přesně.

Překvapivým výsledkem měření je velmi silná nesymetrie. Výsledky intenzity v úhlu  $-10^\circ$  a  $+10^\circ$  by měly být symetrické, tedy přibližně stejné hodnoty. Výsledek se však liší téměř o polovinu. Hodnoty jsou vyznačeny v tabulce níže tučným písmem.

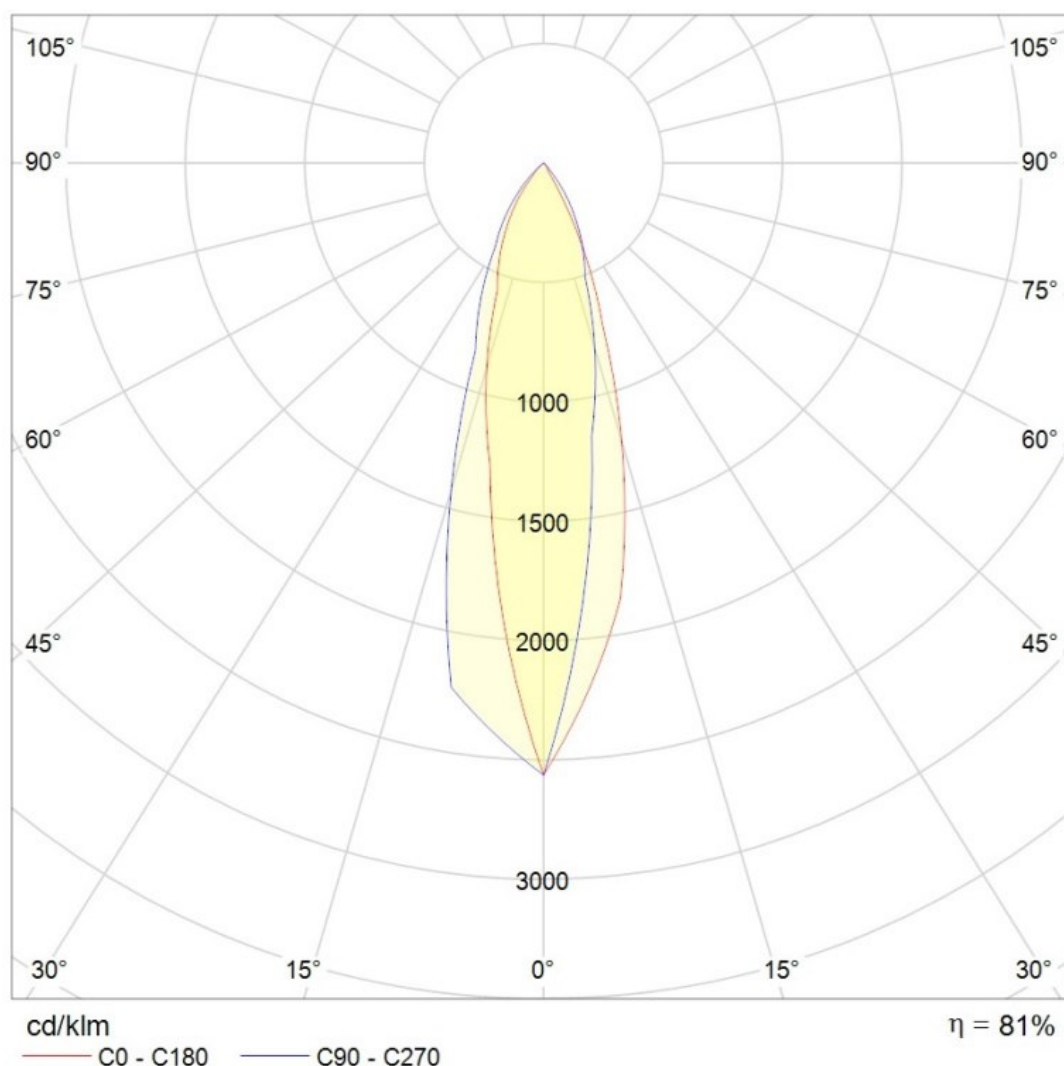
Tabulka č. 5.3 – Hledání vyzařovacího úhlu

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
-40	0	343,5090813
-30	0	795,5067369
-20	0	1644,526785
<b>-10</b>	<b>0</b>	<b>4383,488293</b>
0	0	5043,362837
<b>10</b>	<b>0</b>	<b>2287,462618</b>
20	0	1008,22535
30	0	537,6238041
40	0	109,7658512
0	-40	153,3754734
0	-30	604,6953543
0	-20	1116,367112
0	-10	2537,37261
0	0	5041,98502
0	10	3641,959207
0	20	1418,887206
0	30	74,000306
0	40	19,74132412

## 5.4 Úloha č. 4 – Uklizená místnost

Silná nesymetrie nemá zjevnou příčinu. Je tedy nutno najít problém, který ji způsobuje. Jak již bylo zmíněno ve čtvrté kapitole, prostředí laboratoře není vhodné pro přesná měření. Proběhl tedy úklid místnosti, zakrytí černým plátnem všech rušivých ploch v okolí optického systému a přesunutí pracovního stolu s počítačem mimo optický systém dále do místnosti, za kulový integrátor.

I po této úpravě místnosti silná nesymetrie měření zůstává stále markantní, viz. Tabulka č. 5.4. K výsledným hodnotám náleží i vyobrazená křivka svítivosti na obrázku 5-1. K vytvoření grafu křivek svítivosti v polárních souřadnicích bylo použito doplňkové utility systému DIALux pro počítačovou simulaci a světelné výpočty, která se jmenuje LDT editor. Výslednou účinnost 81% vyhodnotila utilita z malého počtu zadaných hodnot.



Obrázek 5-1. Křivka svítivosti po uklizení místnosti

Tabulka č. 5.4 – Silná nesymetrie i po úklidu místnosti

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
0	-40	150,99131
0	-30	599,5727091
0	-20	1109,146143
0	-10	2527,759986
0	0	5026,435003
0	10	3628,721913
0	20	1413,894598
0	30	73,81969583
0	40	19,79455236
-40	0	343,0920495
-30	0	792,2266984
-20	0	1637,189117
<b>-10</b>	<b>0</b>	<b>4371,133437</b>
0	0	5024,311685
<b>10</b>	<b>0</b>	<b>2274,265998</b>
20	0	995,1420134
30	0	513,0344432
40	0	87,17212467

## 5.5 Úloha č. 5 – Otočení reflektoru

V případě, že by byl reflektor poškozený, například promáčkнутý, prohnutý na jednu stranu nebo utrpěl jakékoliv pokroucení, musela by se tato nesymetrie projevit i po jeho otočení. Byl tedy otočen o 120° ve směru hodinových ručiček a proběhlo další měření.

Hodnoty stále zůstaly nesymetrické, konkrétně na pravou stranu od fotometrické lavice. Nabízí se tedy otázka, čím může být tato nelinearita způsobena. Řešení je uvedeno v kapitole 5.8.

Tabulka č. 5.5 – Silná nesymetrie i po otočení reflektoru

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
-40	0	343,2597605
-30	0	793,5947591
-20	0	1635,542488
<b>-10</b>	<b>0</b>	<b>4412,751801</b>
0	0	5021,220531
<b>10</b>	<b>0</b>	<b>2263,413586</b>
20	0	993,6585678
30	0	510,7938273
40	0	85,47044558

## 5.6 Úloha č. 6 – Křivka svítivosti hlubokozářiče, první měření

Nyní je na řadě šestá úloha, která má za úkol změřit celou křivku svítivosti hlubokozářiče. Jedná se o první měření, které bylo provedeno za účelem zjištění opakovatelnosti.

Jelikož je úhel vyzařování pouze  $26^\circ$  až  $29^\circ$ , proběhne měření pouze v rozsahu  $V = (-20^\circ$  do  $20^\circ)$  a  $H = (-20^\circ$  do  $20^\circ)$  s krokem  $2^\circ$ .

Tabulka č. 5.6 – Křivka svítivosti hlubokozářiče, první měření

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)	Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
-20	0	1634,051454	0	-20	1110,867002
-18	0	1955,249439	0	-18	1276,446985
-16	0	2361,367234	0	-16	1487,374907
-14	0	2863,418142	0	-14	1757,832423
-12	0	3503,540471	0	-12	2104,63964
-10	0	4405,928122	0	-10	2535,445487
-8	0	4904,765165	0	-8	3062,802715
-6	0	5003,039231	0	-6	3795,957496
-4	0	5002,221021	0	-4	4592,14463
-2	0	5008,351239	0	-2	4958,342836
0	0	5019,244512	0	0	5017,906985
2	0	4894,489393	0	2	5012,530885
4	0	4329,002292	0	4	5002,455525
6	0	3378,706036	0	6	4905,320357
8	0	2767,074958	0	8	4454,662994
10	0	2264,639789	0	10	3594,87722
12	0	1877,078613	0	12	2945,286244
14	0	1573,387563	0	14	2431,965732
16	0	1333,909848	0	16	2009,101276
18	0	1143,601843	0	18	1675,009995
20	0	993,1908711	0	20	1413,670454

## 5.7 Úloha č. 7 – Křivka svítivosti hlubokozářiče, druhé měření

Optický systém mohl být do druhého dne mírně pozměněn vlivem demontáže a montáže světelného zdroje na goniometr. Dále mohlo dojít ke změně sestavy vlivem pracovní činnosti jiných uživatelů laboratoře. Cílem bylo ověřit opakovatelnost měření celé křivky svítivosti hlubokozářiče. I po správném zahoření vyšly jen mírně rozdílné hodnoty, než předchozí den. Druhým pokusným měřením tento den bylo měření křivek svítivosti s odhrnutým závěsem – úroveň směrové nesymetrie poklesla, ovšem nijak markantně. Výsledky je možno vidět v tabulce. Směrová nesymetrie zůstává stále hlavním problémem měření.

Tabulka č. 5.7 – Křivka svítivosti hlubokozářiče, druhé měření

Osa H	Osa V	Intenzita (cd) Původní sestava	Intenzita (cd) Sestava bez závěsu
-20	0	1553,865994	1515,069003
-18	0	1854,837432	1806,366829
-16	0	2232,030776	2170,517967
-14	0	2709,039995	2634,903772
-12	0	3275,102685	3183,303298
-10	0	4103,659783	3980,32982
-8	0	4828,075722	4754,40412
-6	0	5021,428293	4989,893032
-4	0	5033,498374	5019,732321
-2	0	5040,77585	5021,250645
0	0	5053,497351	5031,57813
2	0	4988,479297	4986,49621
4	0	4588,480424	4652,168076
6	0	3657,465381	3762,919691
8	0	2960,487036	3018,660914
10	0	2432,361152	2483,958254
12	0	2003,732231	2041,540527
14	0	1673,975342	1702,990924
16	0	1415,321567	1438,31727
18	0	1207,75211	1225,359663
20	0	1045,223522	1058,955097



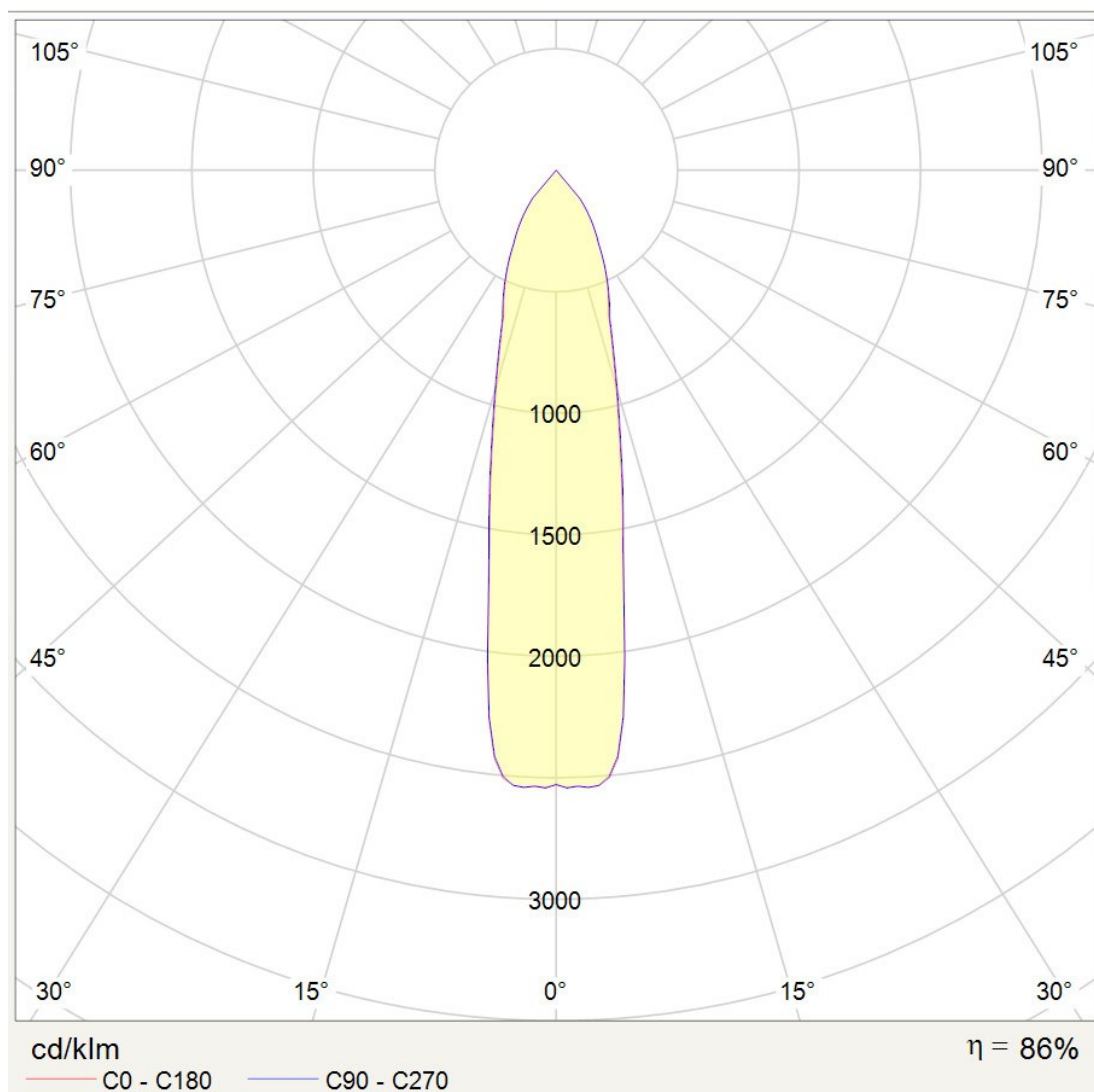
## 5.8 Úloha č. 8 – Křivka svítivosti hlubokozářiče, třetí měření

Na programu třetího dne měření byly další úpravy směřující k hledání řešení problému s nesymetrií. Tento problém byl nalezen v nesprávném nastavení shodnosti optických os. Vzhledem k tomu, že měřené svítidlo je hlubokozářič, již velmi malý úhel (v řádu jednotek stupňů) může mít velký vliv na hranicích vyzařovacího úhlu svítidla. Jelikož se v tomto případě jednalo o tak malý úhel, že ho nebylo možno dorovnat fyzickým nastavením směru svítidla pomocí laserového paprsku, proběhla sada zkušebních měření s cílem zjistit odchylku úhlu a následně ji dorovnat úpravou nulové polohy goniometru přímo v nastavení programu, jak je popsáno v kapitole 4.7.3. Další měření křivky svítivosti tentokrát proběhlo s nižším krokem – úhel se mění o 1°.

Díky přenastavení nulové polohy goniometru byl problém s nesymetrií téměř vyřešen – ještě přesnější odstranění nesymetrie by bylo možné dalším opakováním předchozích kroků a vhodnými úpravami místnosti.

Tabulka č. 5.8 – Křivka svítivosti hlubokozářiče, třetí měření

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)	Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
-20	0	1264,016323	1	0	4982,554184
-19	0	1368,590494	2	0	4972,072717
-18	0	1484,497298	3	0	4987,623325
-17	0	1616,503615	4	0	4976,358733
-16	0	1765,753032	5	0	4922,093
-15	0	1937,730766	6	0	4770,069739
-14	0	2124,076904	7	0	4453,639873
-13	0	2337,671798	8	0	3988,539789
-12	0	2581,685645	9	0	3487,942584
-11	0	2841,612115	10	0	3102,269569
-10	0	3126,350946	11	0	2811,089082
-9	0	3495,100017	12	0	2547,357344
-8	0	3974,932872	13	0	2304,183042
-7	0	4441,652999	14	0	2088,024449
-6	0	4752,830312	15	0	1902,270582
-5	0	4908,035288	16	0	1735,658177
-4	0	4973,878648	17	0	1588,509704
-3	0	4986,7393	18	0	1458,1251
-2	0	4972,422577	19	0	1343,979317
-1	0	4987,017747	20	0	1241,179797
0	0	4957,212959			



Obrázek 5-2. Výsledná křivka svítivosti

V Příloze č. 2 se nachází katalogový list použitého reflektoru, který obsahuje výrobcem definovanou křivku svítivosti k použitému stejnému LED čipu. **Výsledný tvar křivky svítivosti i účinnost se shoduje s hodnotami naměřenými v této úloze. To je důkaz přesné kalibrace a nastavení měřicí soustavy Gooch & Housego v měřící laboratoři VŠB-TUO.**

## 5.9 Úloha č. 8 – Měření spektrálních charakteristik hlubokozářiče

Celý optický systém umožňuje kromě měření křivek svítivosti také měření spektrálních charakteristik. Ke každému změřenému úhlu zapíše počítač pro jednotlivé hodnoty vlnových délek hodnoty z celého spektra viditelného záření od 380 nm do 780 nm dané hodnoty intenzity pro sestavení spektrálních charakteristik. Jedná se o velké množství hodnot, které nebudou zahrnuty v této diplomové práci, pouze zde budou vyjádřeny výsledné charakteristiky.

### 5.9.1 Zadání úlohy na měření spektrálních charakteristik

Změřte spektrální charakteristiky hlubokozářiče v základní, nulové poloze. Dále pomocí měření křivek svítivosti zjistěte, ve kterém úhlu se nachází poloviční pokles vyzařování měřeného hlubokozářiče. V tomto bodě opět změřte spektrální charakteristiku vyzařování (kapitola 5.8). Zjistěte, jaký je nejnižší možný krok (úhel) pro měření spektrálních charakteristik (kapitola 5.9). Normalizujte a porovnejte vhodným způsobem mezi sebou charakteristiky v nulové poloze s reflektorem a v úhlu s polovičním poklesem svítivosti (kapitola 5.10).

### 5.9.2 Křivka svítivosti LED čipu bez reflektoru

Z hlubokozářiče byl odebrán reflektor, aby bylo možno změřit křivku svítivosti samotného čipu LED. Jedná se pouze o doplňující úlohu, ve které je možno vidět, jak díky zúžení světelného paprsku pomocí optiky naroste hodnota svítivosti v hlavní ose. Dále se díky tomuto měření opět projevila nelinearita všech měření.

Měření proběhlo v úhlu od  $-60^\circ$  do  $60^\circ$  v horizontální poloze. Vyšší hodnoty úhlu v celém rozsahu není možné dosáhnout díky stínění ramene goniometru. V tabulce je možno vidět, že hodnoty intenzity jsou skoro pětkrát menší, než po nasazení reflektoru.

Tabulka č. 5.9 – Křivka svítivosti samotného čipu

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
-60	0	56,71045298
-45	0	533,2717574
-30	0	652,3100804
-15	0	715,6332321
0	0	730,9642731
15	0	699,2031261
30	0	608,6132476
45	0	463,9741386
60	0	213,6145165

### 5.9.3 Hledání přesného vyzařovacího úhlu hlubokozářiče

Dalším úkolem je najít přesnou hodnotu úhlu, ve kterém se nachází hranice křivky svítivosti hlubokozářiče. Ta se nachází přesně v polovině intenzity záření. Nejprve je zapotřebí změřit, jaká je nejvyšší hodnota intenzity v okolí nuly. Výsledek je zvýrazněn v tabulce.

Tabulka č. 5.10 – Nejvyšší hodnota intenzity

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
-5	0	4994,811357
-4	0	4989,618226
-3	0	4998,159398
-2	0	4994,180647
-1	0	5007,32153
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5009,612144</b>
1	0	5003,087239
2	0	4958,268998
3	0	4841,592277
4	0	4599,977818
5	0	4190,095085

Jelikož je přibližná hodnota intenzity v nule 5000 cd, hledáme hodnotu kolem 2500 cd. Dle předchozích měření spektrálních charakteristik (kapitola 5.8) víme, že se poloviční hodnota intenzity nachází na horizontální ose v rozmezí  $-13^\circ$  až  $-11^\circ$  v záporném úhlu a v rozmezí  $11^\circ$  až  $13^\circ$  kladného úhlu. Tuto skutečnost ověříme dalším měřením s krokem  $0,1^\circ$  v tomto rozsahu. Měření proběhlo úspěšně.

Tabulka č. 5.11 – Ověření přibližné hranice úhlu

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
-12,4	0	2478,545305
-12,3	0	2504,470894
-12,2	0	2529,926711
12	0	2543,51058
12,1	0	2519,154863
12,2	0	2494,491032

Nyní je na řadě nalezení přesného úhlu poloviční svítivosti. Během pokusných měření bylo zjištěno, že goniometr má možnost pohybu kromě celých stupňů také v minutách. To je potřeba pro nalezení přesného úhlu. V dalších tabulkách je možno vidět výsledky měření křivky svítivosti s krokem  $0,01^\circ$  právě v hledaném okolí  $-12^\circ$  až  $-13^\circ$  v záporné ose a  $12^\circ$  až  $13^\circ$  v ose kladné. Výsledek je zvýrazněn v tabulce. Jedná se o úhly  $-12,31^\circ$  a  $12,17^\circ$ . Pro tyto úhly byly podobně jako pro nulovou polohu změřeny spektrální charakteristiky. Opět díky rozsahu hodnot spektrálních charakteristik nejsou tyto hodnoty k dispozici v této diplomové práci.

Tabulka č. 5.12 – Nalezení přesného úhlu v záporné horizontální ose

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
-12,4	0	2477,005048
-12,3906	0	2480,110773
-12,3813	0	2482,190713
-12,3719	0	2486,145101
-12,3625	0	2487,407074
-12,3531	0	2490,218718
-12,3438	0	2492,817928
-12,3344	0	2495,456914
-12,325	0	2497,034493
<b>-12,3156</b>	<b>0</b>	<b>2501,272571</b>
-12,3062	0	2502,245366

Tabulka č. 5.13 - Nalezení přesného úhlu v kladné horizontální ose

Osa H	Osa V	Intenzita (cd)
12,1	0	2518,451415
12,10938	0	2516,485807
12,11875	0	2513,08024
12,12813	0	2511,29332
12,1375	0	2509,031523
12,14688	0	2507,029635
12,15625	0	2504,91284
12,16562	0	2502,679581
<b>12,175</b>	<b>0</b>	<b>2501,185372</b>
12,18437	0	2499,311975
12,19375	0	2496,595246

**Body s poloviční svítivostí v horizontální rovině se nacházejí v úhlech -12,31° a 12,17°. Sečtením nám vychází vyzářovací úhel hlubokozářiče 24,48°.**

Porovnání spektrálních charakteristik bude provedeno pouze pro hodnotu úhlu -12,31°.

## 5.10 Nejnižší možný krok goniometru

Z předešlého měření je možno vidět, jaký je nejnižší možný krok, kterým se může goniometr pohybovat. Pro reálné situace se tak malé kroky v praxi nevyužívají, ale jelikož se jedná o nový a velmi drahý přístroj zakoupený VŠB-TUO, je důležité to zjistit.

Měřením bylo zjištěno, že nejnižší možný krok goniometru je 0,01°. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulkách v kapitole 5.9.3.

## 5.11 Srovnání spektrálních charakteristik

### 5.11.1 Převod na relativní hodnoty - normalizace

Pro porovnání spektrálních charakteristik je potřeba naměřené hodnoty vhodným způsobem normalizovat. Pojem normalizace využívá obslužný program Gooch & Housego k OL770. Obecně je normalizace známá jako převedení absolutních hodnot na hodnoty relativní. Typickým příkladem relativních (normalizovaných) hodnot je procentuální vyjádření.

Pro účely této diplomové práce bude dále využíván pojem normalizace.

Nejprve budeme normalizovat hodnoty pro nulovou pozici, poté pro zbývající polohu na hranici křivky svítivosti.

#### 5.11.1.1 Normalizace hodnot v nulové pozici bez reflektoru

Prvním krokem je nalezení maximální hodnoty intenzity ze spektrální charakteristiky. Toho dosáhneme tak, že seřadíme hodnoty od nejvyšší po nejnižší. V tomto konkrétním případě se jedná o hodnotu  $s_{01max} = 2,17 \cdot 10^{-2}$ . Maximální procentuální hodnota je 100%, podělíme tedy 100% maximální hodnotou intenzity a získáme konstantu pro nulovou pozici bez reflektoru  $k = 4603,88348164$ . Touto konstantou vynásobíme všechny hodnoty intenzity v celém spektru měřených vlnových délek. Získáme normalizované hodnoty intenzit ze spektrálních charakteristik. Slouží pouze jako příklad normalizace, tyto hodnoty nebudou díky nelinearitě použity.

#### 5.11.1.2 Normalizace hodnot v nulové pozici s reflektorem

Stejný postup jako v prvním případě provedeme pro hodnoty intenzity spektrálních charakteristik v nulové pozici s reflektorem. Nejvyšší hodnota je  $s_{01max} = 0,115481$ , Procentuální hodnotu 100% vydělíme nejvyšší hodnotou intenzity a získáme konstantu  $k_1 = 865,94$ . Touto konstantou vynásobíme všechny hodnoty spektra, čímž získáme první sadu výsledků pro vygenerování první charakteristiky.

#### 5.11.1.3 Normalizace hodnot v mezním úhlu v záporné horizontální ose

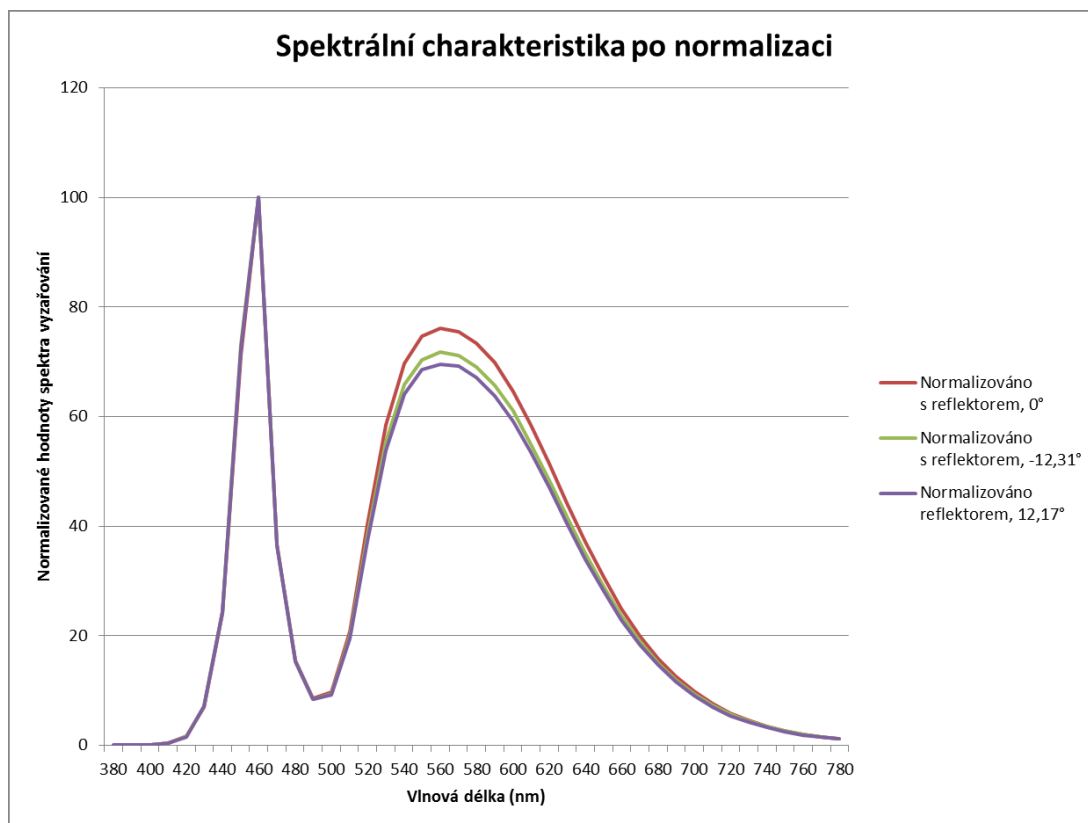
Opět provedeme ten samý postup, tentokrát pro hodnoty spektrálních charakteristik v úhlu  $-12,31^\circ$ . Nejvyšší hodnota je  $s_{02max} = 0,061663$ , po dělení získáme konstantu  $k_2 = 1621,698$ . Vynásobíme všechny hodnoty a můžeme sestavit druhou charakteristiku.

#### 5.11.1.4 Normalizace hodnot v mezním úhlu v kladné horizontální ose

Postup se opět opakuje – normalizujeme hodnoty spektrálních charakteristik v úhlu  $12,17^\circ$ . Nejvyšší hodnota je  $s_{03max} = 0,063429$ . Po následném dělení získáme konstantu  $k_3 = 1576,561$ . Posledním krokem je vynásobení všech hodnot touto konstantou a sestojíme třetí charakteristiku.

### 5.11.2 Výsledná porovnávací charakteristika

Po normalizaci můžeme vynést jednotlivé spektrální charakteristiky do jedné společné porovnávací charakteristiky. Křivky jsou tři. První bude vytvořena z normalizovaných hodnot spektra v nulové, základní poloze. Druhá bude vytvořena z normalizovaných hodnot spektra na hranici úhlu vyzařování v záporném úhlu vyzařování, zatímco třetí charakteristika je tvořena z normalizovaných hodnot spektra na hranici úhlu vyzařování v kladném úhlu vyzařování.



Obr. 5-3. Spektrální charakteristika po normalizaci

Na výsledné charakteristice můžeme vidět, jak se od sebe vzájemně liší normalizované hodnoty spektra v celém rozsahu viditelného záření. V oblasti od 380 do 500 nm je tvar křivky vzájemně shodný. K mírné změně dochází v rozmezí 500 až 700 nm. Poté jsou charakteristiky opět totožné.

Jediný nepatrný rozdíl ve tvaru charakteristiky je v oblasti vlnových délek 540-580 nm (zelená až žlutá). Zde vidíme, že rozdíl mezi normalizovanými hodnotami v nulovém úhlu a na hranici vyzařovacího úhlu v oblasti zelené až žluté barvy není ani 5%. Tento rozdíl je přibližně stejný také v kladných hodnotách měřeného úhlu. V tomto případě je vidět, že výrobce hlubokozářiče neudělal žádnou výraznou chybu, protože spektrální charakteristika se s úhlem téměř nemění.

Porovnat rozdíl ve spektrální charakteristice je také možno pomocí vyhodnocení teploty chromatičnosti v jednotlivých úhlech, což je předmětem posledního měření v další kapitole.

## 5.12 Měření teploty chromatičnosti (CCT)

Spektroradiometr výrobce Gooch & Housego ve vlastnictví VŠB-TUO má možnost měřit hodnoty spektrální charakteristiky. Mimo to může také vyhodnotit teplotu chromatičnosti. V skriptovacím programu je nutno přidat zápis této hodnoty do programu Microsoft® Excel®.

Změříme tedy teplotu chromatičnosti v nulovém úhlu vyzařování a na obou hranicích vyzařování hlubokozářiče, a porovnáme je mezi sebou. Toto porovnání má pro nás podobný význam, jako porovnání normalizovaných hodnot spektrálních charakteristik.

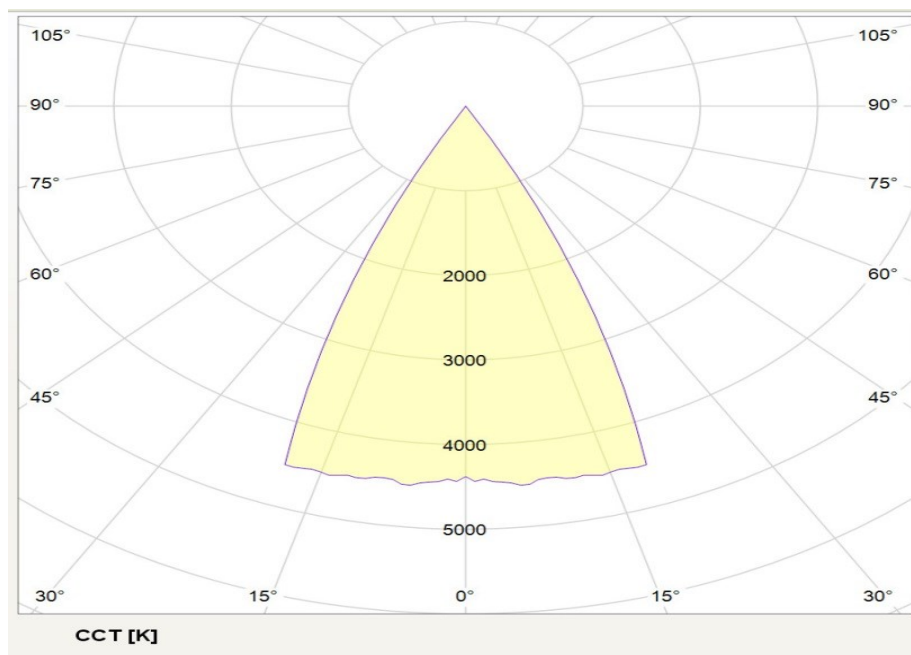
Tabulka č. 5.14 – Hodnoty teplot chromatičnosti v jednotlivých úhlech

CCT v úhlu 0°			
Osa H	Osa V	Intenzita (cd)	CCT
0	0	4957,212959	4377,991

CCT v úhlu -12,31°			
Osa H	Osa V	Intenzita (cd)	CCT
-12,3156	0	2501,272571	4485,793

CCT v úhlu 12,17°			
Osa H	Osa V	Intenzita (cd)	CCT
12,175	0	2501,185372	4524,322

Měřením v těchto třech úhlech bylo zjištěno, že teploty chromatičnosti se téměř nemění. Proto bylo měření opakováno stejně jako měření křivky svítivosti v rozsahu -20° až 20° s krokem 1°. Výsledky byly vyhodnoceny do grafu v polárních souřadnicích. Z tohoto grafu je zřejmé, že závislost teploty chromatičnosti na měřeném úhlu je téměř konstantní s mírným zvlněním, jehož příčinu již nebylo možno v rámci této diplomové práce zjistit.



Obr. 5-4. Křivka CCT v polárních souřadnicích



## 6 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce byla tematika měření světelně technických veličin, konkrétně pomocí obecně známých metod a pomocí spektrometru ve vlastnictví VŠB-TUO od firmy Gooch & Housego. Celá tato diplomová práce je rozdělena do pěti kapitol. První tři kapitoly zahrnují teoretickou část diplomové práce, zbývající dvě část praktickou.

První kapitola byla věnována fotometrickým měřením obecně. Jsou zde popsány základní metody měření (vizuální a fyzikální), jaké jsou podmínky měření a druhy fotometrie. Následoval popis, jak se měří konkrétní světelně technické veličiny. Nedílnou součástí měření jsou také nejistoty měření.

Druhá kapitola pojednává o spektrometru od firmy Gooch & Housego, který posloužil jako měřicí přístroj pro měření křivek svítivosti a spektrálních charakteristik. Představení parametrů přístroje, jaké světelně technické veličiny je možno díky tomuto přístroji měřit a v jakém rozsahu vlnových délek. V současné době je možno díky tomu přístroji měřit pouze křivky svítivosti, spektrální charakteristiky, teplotu chromatičnosti a hodnoty osvětlenosti. Pro měření dalších světelně technických veličin by byla nutná investice do doplňujících přístrojů.

Třetí kapitola popisuje, jak lze teoreticky i prakticky měřit křivky svítivosti. Dále nastiňuje problém oslnění řidičů při míjení protijedoucího auta, kdy je potřeba změřit spektrální charakteristiky v přímém směru (nulová poloha) a na hranici úhlu vyzařování, porovnat je mezi sebou a za pomoci naměřených hodnot tento negativní jev omezit úpravou hlubokozářiče samotným výrobcem.

Čtvrtá kapitola se zabývá návrhem laboratorní úlohy na měření křivek svítivosti. Obsahuje zadání laboratorní úlohy, správnou konfiguraci optického systému a popisuje, jak má vypadat optimální laboratoř pro správné a relevantní měření. Dále je v této kapitole podrobně popsána obsluha programu pro ovládání optického systému pomocí stolního počítače.

Pátý a poslední celek je zaměřen na konkrétní měřicí úlohy pomocí spektrometru. Vyhodnocovali se výsledky měření hlubokozářiče L2-HZ26. Úlohy byly různé - snaha dosáhnout opakovatelnosti měření, řešení problému se směrovou nesymetrií a vliv různých úprav laboratoře na výsledky měření. Hlavním úkolem bylo změřit křivky svítivosti hlubokozářiče. Výsledná naměřená křivka svítivosti se shoduje s křivkou uvedenou samotným výrobcem, což znamená, že bylo dosaženo přesné kalibrace a správného nastavení měřicí soustavy Gooch & Housego.

Dalším úkolem bylo podrobně změřit hodnoty různých spektrálních charakteristik. Měřili se spektrální charakteristiky pro svítidlo bez reflektoru v nulové poloze (v přímém směru), s reflektorem v přímém směru, dále pro svítidlo na hranici úhlu vyzařování, a to v levém i v pravém směru od osy vyzařování. Tyto charakteristiky se normalizovaly a vzájemně porovnávaly mezi sebou. Výsledek je opět velmi kladný – odchylka mezi jednotlivými křivkami byla zjištělná pouze v rozsahu vlnových délek 540-580 nm a to pouze v řádu jednotek procent. Z těchto výsledků vyplývá, že u zvoleného hlubokozářiče se neprojevují vady optického systému, jejichž měření mělo být předmětem této diplomové práce.

Výsledek této diplomové práce je jednoznačný. Byly vyjmenovány všechny problémy, které se od nainstalování celého systému po finální měření objevily, a bylo popsáno jejich řešení. Dále tato diplomová práce obsahuje podrobný popis obsluhy celého optického systému. Bylo dosaženo přesných výsledků, shodných s údaji od výrobce. Laboratoř světelné techniky VŠB-TUO může být nyní plně využita pro měření svítidel, dodaných z veřejného či soukromého sektoru, čímž je možno zajistit návratnost investice do celého systému.

## 7 Seznam použité literatury

- [1] Sokanský, K.: *Světelná technika*. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: *Světlo a osvětlování*. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TUO
- [4] Manuály ke spektrometru Gooch and Housego OL 770VIS-LED/G-3 LED
- [5] Dostupné z WWW <https://www.megapixel.cz/gossen-luxmetr-mavolux-5032-c>
- [6] Dostupné z WWW <http://sensing.konicaminolta.us/products/lx-100-luminance-meter/>
- [7] Zadání druhého protokolu z předmětu EST (Měření 2 – Křivky svítivosti), VŠB-TUO

## **8 Seznam příloh**

**Příloha č. 1: Fotografie optického systému**

**Příloha č. 2: Parametry reflektoru LEDIL, typ C12597**

**Příloha č. 3: Parametry LED čipu, typ CLL042**

**Příloha č. 4: Ukázkový protokol měření (syllabus)**